UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Sinergias entre la conservación de ecosistemas y el cumplimiento de las metas climáticas de México: análisis de usos de suelo y vegetación en ANP y ADVC bajo escenarios NDC-GCAM

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Ambiental

P R E S E N T A

Montserrat Calderón Mota

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Bernardo Adolfo Bastien Olvera

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado SINERGIAS ENTRE LA CONSERVACION DE ECOSISTEMAS Y EL CUMPLIMIENTO DE LAS METAS CLIMATICAS DE MEXICO: ANALISIS DE USOS DE SUELO Y VEGETACION EN ANP Y ADVC BAJO ESCENARIOS NDC-GCAM que presenté para obtener el titulo de INGENIERA AMBIENTAL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

MontserratC.M

MONTSERRAT CALDERON MOTA
Número de cuenta: 319156588



La tesis titulada “Sinergias entre la conservación de ecosistemas y el cumplimiento de las metas climáticas de México: análisis de usos de suelo y vegetación en ANP y ADVC bajo escenarios NDC-GCAM” fue desarrollada en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAyCC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), bajo la dirección del Dr. Bernardo Adolfo Bastien Olvera.

Asimismo, agradezco al Programa de Apoyo para la Titulación y Obtención de Grado del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por el apoyo económico otorgado mediante la beca del Fondo Especial de Ingresos Extraordinarios, el cual contribuyó a la realización y conclusión de este trabajo.

Agradecimientos

A mis padres, Patricia Mota Mendoza y Martín Calderón Segura, por acompañarme durante este largo camino estudiantil con amor incondicional, por confiar siempre en mí, permanecer a mi lado durante las noches de desvelo e impulsarme a alcanzar mis sueños y metas. A mi mami, por darme el cariño y la tranquilidad necesarios para recorrer este camino; a mi tío Rudy, por compartir conmigo su sabiduría, y a toda mi familia, por estar presente y acompañarme en los momentos más importantes de mi vida.

A Goyo y Manchas, los dos gatos que llegaron a cambiar mi vida y me recordaron la importancia de cuidar este planeta. Gracias a Goyo por escuchar mis clases y acompañarme mientras hacía mis tareas, y a Manchas por ser una gran guardiana.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a mi querida Facultad de Ingeniería, por brindarme las herramientas para llegar hasta aquí, por las oportunidades que transformaron mi vida y por permitirme sentirme orgullosa de haber recorrido sus aulas y su campus. Al PINCC y al ICAyCC, particularmente al Laboratorio de Ecosistemas, Cambio Climático y Sociedad, por abrirme sus puertas, permitirme desarrollar mis conocimientos y confirmar que la investigación es una de mis más grandes pasiones.

A mi familia universitaria, especialmente a Alondra Bravo, Antonio Mendoza, Ariadna Porras y Hanayo García, por su amistad, compañía y por ser un gran equipo dentro y fuera de las aulas. A todos mis compañeros, por las experiencias y enseñanzas compartidas, y a Xipe Martínez, por haber formado parte de mi vida desde la infancia. A mis compañeros del Servicio Social, por hacer más ameno ese tiempo de aprendizaje, y al profesor Enrique Contreras, por sus enseñanzas y por compartir conmigo algunos de los principios que dieron origen a esta investigación.

Al M.I. Rodrigo Muñoz, por ser un guía fundamental en mi camino como investigadora, confiar en mí y brindarme la oportunidad de colaborar en la actualización de la NDC de México, experiencia que despertó y fortaleció mi pasión por la investigación y permitió dar inicio a esta tesis. Al Dr. Bernardo Bastien Olvera, por confiar en mí, asesorar este trabajo, abrirme las puertas de su laboratorio e impulsarme a asumir nuevos retos. A mis compañeros de laboratorio, por compartir sus conocimientos y hacer de este espacio un lugar de aprendizaje constante.

A SIAFI, NASTT y SOEMA, por las oportunidades para desarrollar habilidades profesionales, vivir experiencias que transformaron mi formación y conocer personas maravillosas. A todos mis profesores y profesoras, por acompañarme desde mis primeros años de estudiante hasta el término de mi carrera, y a mis sinodales, por sus enseñanzas y valiosas aportaciones para mejorar este trabajo.

A Dios, por permitirme vivir esta vida tan maravillosa y conocer a personas que la han hecho aún más brillante. Finalmente, al mar, por recordarme por qué elegí estudiar Ingeniería Ambiental y que cada vida en este mundo importa.

ÍNDICE

Objetivo 7
Alcances 7
Introducción 9
Capítulo 1: Contexto de política climática y conservación 12
1.1 Política climática 12
1.1.1 Contexto global 12
1.1.2 Metas condicionadas y no condicionadas 13
1.1.3 Política climática en México 15
1.1.4 Medidas de mitigación del sector USCUSS 17
1.2 Marco político de la Conservación 20
1.2.1 Contexto global 20
1.2.2 Política de conservación en México 22
Capítulo 2: Territorio y mitigación climática 33
2.1 Sistemas de Información Geográfica como herramienta para la gestión ambiental 33
2.2 Cartografía de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI como base para el análisis territorial 35
2.3 Dinámica del carbono en los ecosistemas forestales 38
2.4 Factores de emisión y almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales 41
2.5 Modelos de evaluación integrada para el análisis del cambio climático 43
2.6 Global Change Analysis Model (GCAM) y su aplicación en el análisis del uso del suelo 46
2.7 Interacción entre estrategias de mitigación y conservación del territorio 50
Capítulo 3: Metodología para Integrar y procesar información geoespacial para el análisis con GCAM 53
3.1 Fuentes de información geoespacial 53
3.2 Integración y procesamiento de la información geoespacial 54
3.3 Fundamentación de la homologación de categorías de INEGI y GCAM. 61
3.4 Criterios utilizados para la homologación 62
3.5 Correspondencia entre las categorías. 63
3.6 Justificación ecológica de las asignaciones 78
3.6.1 Categoría forest 78
3.6.2 Categoría shrubs 78
3.6.3 Categoría Grass and pasture 79
3.6.4 Categoría crops 79

3.6.5 Categoría rock and desert 79
3.7 Integración de los escenarios de GCAM al análisis espacial 80
3.8 Supuestos utilizados en la construcción de los escenarios 81
3.9 Procesamiento de las transiciones de uso del suelo utilizadas en los escenarios 82
3.10 Procedimiento para el análisis de las trayectorias de uso del suelo 84
Capítulo 4: Resultados 87
4.1 Criterio para la evaluación comparativa de los escenarios 87
4.2 Diferencias de uso del suelo y vegetación respecto al escenario de referencia en los años meta 89
4.2.1 Escenario de cero emisiones netas al 2050 90
4.2.2 Escenario de cero emisiones netas al 2055 90
4.2.3 Escenario de cero emisiones netas al 2060 91
4.2.4 Comparación de los cambios entre los tres años meta 92
4.3 Trayectorias de las categorías de uso del suelo y vegetación bajo los escenarios analizados 92
4.3.1 *Biomass* 95
4.3.2 *Crops* 95
4.3.3 *Forest (managed)* 96
4.3.4 *Forest (unmanaged)* 97
4.3.5 *Grass* 97
4.3.6 *Otherarable* 98
4.3.7 *Pasture (grazed)* 98
4.3.8 *Pasture (other)* 99
4.3.9 *Rock and desert* 99
4.3.10 *Shrubs* 100
4.3.11 *Tundra* 101
4.3.12 *Urban* 101
4.3.13 Comparación general de las cuatro trayectorias 101
4.4 Cuantificación y comparación de las superficies proyectadas en el año 2050 102
Capítulo 5: Discusión de resultados y conclusiones 107
5.1 Discusión de los resultados 107
5.1.1 Interpretación de los cambios en el uso del suelo bajo los escenarios de mitigación 109
5.1.2 Influencia del horizonte temporal en la comparación de las trayectorias de mitigación 115
5.1.3 Relación entre las modificaciones proyectadas del uso del suelo y los objetivos de conservación 118

5.2 Limitaciones del estudio 123
5.3 Conclusiones 127
5.3.1 Aporte para la NDC y la planeación climática ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Bibliografía 132
ANEXO A Superficie protegida por categoría de Uso del Suelo y Vegetación de la Serie VII del INEGI y región GCAM 140
Anexo B Insumos de conversiones de uso del suelo y carbono 163
Anexo C Justificación de la homologación entre la Serie VII y GCAM 172
ANEXO D. Superficie por categoría de uso del suelo en los escenarios de gcam y diferencias respecto al escenario de referencia en 2050 175

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Probabilidad de limitar el calentamiento global bajo diferentes escenarios climáticos. 14
Figura 2. Porcentaje de Áreas Naturales Protegidas Federales protegidas según su categoría de manejo 24
Figura 3. Mapa de la distribución de Áreas Naturales Protegidas (naranja) y Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (verde) en México. 27
Figura 4. Mapa del área total protegida por instrumentos de conservación a nivel estatal. 28
Figura 5. Uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, Serie VII (Continuo Nacional)..... 36
Figura 6. Evolución de la superficie forestal de México (1990–2025)..... 42
Figura 7. Funcionamiento del Modelo GCAM..... 48
Figura 8. Distribución de las entidades federativas de México entre las regiones del modelo GCAM. 55
Figura 9. Ecorregiones de nivel I de México en las regiones del modelo GCAM. 55
Figura 10. Distribución de los usos de suelo y tipos de vegetación en las regiones del modelo GCAM y ecorregiones de nivel I de México. 56
Figura 11. Usos de suelo y tipos de vegetación dentro de un Área Natural Protegida (ANP) en el contexto de las regiones del modelo GCAM. 57
Figura 12. Usos de suelo y tipos de vegetación dentro de un Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC) en el contexto de las regiones del modelo GCAM. 58
Figura 13. Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) en México. 59
Figura 14. Flujo metodológico para la integración y procesamiento de la información geoespacial. . 60
Figura 15. Diferencias por categoría de escenarios de cero emisiones netas vs referencia 89
Figura 16. Trayectoria de las categorías de uso del suelo hasta el año meta de cada escenario VS referencia. a) Primer grupo de categorías. 93
Figura 17. Trayectoria de las categorías de uso del suelo hasta el año meta de cada escenario VS referencia. b) Segundo grupo de categorías. 94
Figura 18. Diferencia de superficie por categoría de uso del suelo y vegetación entre los escenarios de cero emisiones netas y el escenario de referencia en 2050 (miles de km²). 104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estrategias de mitigación del sector USCUSS para las diferentes NDC de México. 18
Tabla 2. Instrumentos aliados de las metas de mitigación del sector USCUSS para las diferentes NDC de México..... 20
Tabla 3. Áreas Naturales Protegidas de carácter federal según su categoría de manejo 23
Tabla 4. Superficie protegida del territorio nacional en las ANP federales 24
Tabla 5. Estadísticas generales de las ADVC certificadas en México 25
Tabla 6. Protección de ecosistemas por Área Destinada Voluntariamente a la Conservación 26
Tabla 7. Superficie protegida por Áreas Naturales Protegidas o Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación por Estado. 29
Tabla 8. Distribución de la superficie protegida por ANP federales según tipo de superficie 32
Tabla 9. Cambio neto anual de la superficie forestal en México..... 42
Tabla 10. Comparación de modelos de evaluación integrada para el análisis de mitigación climática y uso del suelo 48
Tabla 11. Fuentes de información utilizadas para la construcción de la base geoespacial. 54
Tabla 12. Homologación directa de las categorías de Uso del Suelo y Vegetación de INEGI con las categorías de GCAM..... 64
Tabla 13. Agrupación de categorías de INEGI en una misma categoría de GCAM según sus características ecológicas. 65
Tabla 14. Asignación de categorías de INEGI a distintas categorías de GCAM según sus características estructurales y estado sucesional. 71
Tabla 15. Diferencias de superficie por categoría de uso del suelo y vegetación entre los escenarios de cero emisiones netas y el escenario de referencia en 2050. 103
Tabla A.1 (bloque 1 de 3) 140
Tabla A.1 (continuación, bloque 2 de 3) 146
Tabla A.1 (continuación, bloque 3 de 3) 151
Tabla A.2. Superficie protegida (km^2) por región GCAM y categoría de uso del suelo de GCAM 157
Tabla A.3. Porcentaje de área protegida por región GCAM y categoría de uso del suelo de GCAM 157
Tabla A.4. Superficie protegida (km^2) por región GCAM y categoría de manejo de Área Natural Protegida 159
Tabla A.5. Distribución porcentual del área protegida por región GCAM y categoría de manejo de Área Natural Protegida 160
Tabla A.6. Superficie por región GCAM y ecorregión, y factores de emisión asociados. 161
Tabla A.7. Factores de emisión por ecorregión para la conversión FL-FL 162

Tabla B.1 Correspondencia de subcategorías y códigos de conversión 163
Tabla B.2 Valores de carbono por conversión, ecorregión y reservorio 166
Tabla B.3 Continuación 2010 a 2019 170
Tabla C.1 Coberturas asignadas a forest 172
Tabla C.2 Coberturas registradas bajo rock and desert 175
Tabla C.3 Cobertura herbácea asignada a grass and pasture 175
Tabla D.1. Superficie modelada y diferencia respecto al escenario de referencia por categoría de uso del suelo en 2050 176

Objetivo

Evaluar el grado de consistencia entre las estrategias de mitigación del cambio climático simuladas mediante GCAM y los objetivos de conservación ambiental en México bajo escenarios de largo plazo.

· Identificar las estrategias de mitigación del cambio climático con incidencia en el uso del suelo relevantes para el análisis en México.

· Caracterizar los objetivos de conservación ambiental considerados para el análisis de su consistencia con las estrategias de mitigación.

· Analizar las interacciones entre las estrategias de mitigación del cambio climático y los objetivos de conservación ambiental, identificando las sinergias y tensiones que se generan entre ambos.

· Evaluar cómo las interacciones entre las estrategias de mitigación y los objetivos de conservación ambiental varían bajo diferentes escenarios de largo plazo.

Alcances

La presente investigación evalúa la consistencia entre estrategias de mitigación del cambio climático y objetivos de conservación ambiental en México mediante el análisis de escenarios prospectivos de largo plazo. El estudio se centra en aquellas estrategias de mitigación con incidencia en el uso del suelo, particularmente las relacionadas con el sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos del Suelo (AFOLU), debido a su potencial para modificar la cobertura y el manejo del territorio, así como por su relevancia para el cumplimiento de los compromisos climáticos nacionales.

El análisis se desarrolla a partir de escenarios generados mediante el modelo Global Change Analysis Model (GCAM), los cuales permiten representar diferentes trayectorias de mitigación bajo supuestos explícitos y comparables. A partir de estos escenarios se identifican las principales estrategias de mitigación, se caracterizan los objetivos de conservación ambiental y se evalúan las interacciones entre ambos, con el propósito de identificar posibles sinergias y tensiones bajo distintos horizontes temporales.

Los resultados corresponden a un análisis prospectivo de carácter ex ante, por lo que representan posibles comportamientos del sistema bajo los supuestos definidos en los escenarios evaluados y no constituyen predicciones del comportamiento futuro ni una evaluación de políticas implementadas. Asimismo, las estrategias analizadas fueron construidas como ejercicios de modelación para explorar diferentes alternativas de mitigación y responden a los criterios y supuestos establecidos durante el desarrollo de las simulaciones.

En este sentido, la investigación proporciona evidencia cuantitativa para comprender la relación entre mitigación y conservación en escenarios de largo plazo, contribuyendo a la discusión sobre la coherencia de las estrategias climáticas con los objetivos de conservación ambiental. Los resultados permiten identificar condiciones bajo las cuales pueden fortalecerse las sinergias o reducirse las tensiones entre ambos objetivos, aportando elementos técnicos para el diseño y evaluación de políticas públicas relacionadas con el cambio climático y el uso sostenible del territorio.

El estudio no evalúa la implementación, efectividad o viabilidad económica, social, política o institucional de las estrategias de mitigación, ni cuantifica los impactos derivados de instrumentos específicos de política pública. De igual forma, las simulaciones analizadas constituyen un insumo técnico desarrollado en el marco de los trabajos de apoyo a la actualización de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) de México y deben interpretarse como un ejercicio de análisis científico, independiente de las decisiones adoptadas en la versión final de dicho instrumento de política climática.

Introducción

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos ambientales contemporáneos debido a sus efectos sobre los sistemas naturales y humanos. Su atención requiere tanto la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero como el fortalecimiento de los procesos que permiten su captura y almacenamiento. En este contexto, la mitigación comprende intervenciones orientadas a reducir las fuentes de emisiones o incrementar los sumideros, por lo que involucra no solo transformaciones en los sistemas energético, industrial y de transporte, sino también modificaciones relacionadas con el uso y manejo del territorio.

El sector de Agricultura, Silvicultura y Otros Usos del Suelo (AFOLU, por sus siglas en inglés) adquiere particular relevancia dentro de estas estrategias debido a su relación directa con los flujos de carbono y con las transformaciones de la cobertura terrestre. Las medidas de mitigación asociadas con este sector pueden modificar la extensión y distribución de bosques, matorrales, pastizales, cultivos y otras categorías de uso del suelo. En consecuencia, las transformaciones territoriales derivadas de las estrategias climáticas pueden tener implicaciones que trascienden la reducción de emisiones y se relacionan con otros objetivos ambientales.

Entre estas implicaciones se encuentra la conservación de la biodiversidad. Los ecosistemas terrestres desempeñan simultáneamente funciones relacionadas con la regulación climática, el almacenamiento de carbono y el mantenimiento de la diversidad biológica. Por ello, las decisiones sobre el uso del suelo pueden generar interacciones entre las estrategias de mitigación del cambio climático y los objetivos de conservación ambiental. Determinadas transformaciones pueden favorecer ambos propósitos y generar sinergias, mientras que otras pueden producir tensiones derivadas de la competencia por el territorio o de cambios en la extensión y distribución de las coberturas naturales.

Esta relación resulta particularmente relevante en México debido a su elevada diversidad biológica y a los compromisos que el país ha adquirido en materia climática y de conservación. En el ámbito climático, México ha establecido compromisos de mitigación mediante sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), en el marco del Acuerdo de París. Paralelamente, el país participa en compromisos internacionales de conservación de la biodiversidad y cuenta con instrumentos nacionales destinados a la protección y manejo del territorio. Aunque ambas agendas persiguen objetivos ambientales distintos, su implementación converge espacialmente, de manera que las decisiones asociadas con una pueden favorecer, limitar o modificar las condiciones para el cumplimiento de la otra.

Esta convergencia plantea la necesidad de analizar no solamente la capacidad de las estrategias de mitigación para contribuir al cumplimiento de las metas climáticas, sino también las transformaciones territoriales que pueden acompañarlas. Alcanzar una

determinada trayectoria de reducción de emisiones no implica necesariamente que los cambios de uso del suelo asociados sean consistentes con los objetivos de conservación. Asimismo, las interacciones entre ambas agendas pueden variar dependiendo de las estrategias consideradas, de los supuestos bajo los cuales se desarrollan y del horizonte temporal en el que se evalúan.
Los escenarios prospectivos permiten estudiar estas relaciones al representar posibles trayectorias futuras bajo conjuntos explícitos de supuestos. En particular, los modelos de evaluación integrada permiten analizar de manera conjunta las interacciones entre diferentes componentes de los sistemas energético, económico, climático y de uso del suelo. Entre ellos, el Global Change Analysis Model (GCAM) permite representar distintas trayectorias de mitigación y los cambios asociados en las categorías de uso del suelo, proporcionando una base para comparar escenarios y analizar sus posibles implicaciones territoriales en horizontes de largo plazo. En esta investigación, los escenarios generados mediante GCAM se emplean precisamente para representar diferentes trayectorias de mitigación bajo supuestos explícitos y comparables.

A partir de este planteamiento, surge la necesidad de examinar en qué medida las transformaciones del uso del suelo asociadas con las estrategias de mitigación del cambio climático son consistentes con los objetivos de conservación ambiental en México. Este análisis requiere considerar no solo los cambios proyectados en la superficie de las distintas categorías de uso del suelo, sino también su relación con el territorio destinado a la conservación, con el propósito de identificar posibles convergencias y tensiones entre ambas agendas.

En este contexto, el objetivo de la presente investigación es evaluar el grado de consistencia entre las estrategias de mitigación del cambio climático y los objetivos de conservación ambiental en México en un horizonte de largo plazo. Para ello, se identifican las estrategias de mitigación con incidencia en el uso del suelo relevantes para el análisis, se caracterizan los objetivos de conservación considerados, se analizan las interacciones entre ambos para identificar las sinergias y tensiones que pueden generarse y se evalúa cómo estas interacciones varían bajo diferentes escenarios de largo plazo.

El estudio se concentra en estrategias de mitigación con incidencia en el uso del suelo, particularmente aquellas relacionadas con el sector AFOLU, y utiliza escenarios prospectivos para examinar sus posibles implicaciones sobre el territorio. En este sentido, el análisis es de carácter ex ante: los escenarios representan posibles comportamientos del sistema bajo los supuestos definidos para su construcción y no constituyen predicciones del comportamiento futuro ni una evaluación de políticas implementadas.

De esta manera, la investigación busca aportar evidencia cuantitativa para comprender la relación entre mitigación del cambio climático y conservación

ambiental en México desde una perspectiva territorial y de largo plazo. La identificación de las condiciones bajo las cuales ambas agendas pueden converger o generar tensiones permite avanzar hacia una comprensión más integrada de sus interacciones y aportar elementos técnicos para considerar conjuntamente los objetivos climáticos, de conservación y de uso sostenible del territorio.

Capítulo 1: Contexto de política climática y conservación

1.1 Política climática

1.1.1 Contexto global

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se estableció en 1992 durante la Cumbre de Río para constituir el marco institucional de la Organización de las Naciones Unidas para coordinar la respuesta internacional frente al cambio climático (Naciones Unidas, s.f.-a). Los países que forman parte de este acuerdo se conocen como Estados Parte y asumen el compromiso de reducir y estabilizar sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la implementación de políticas públicas, estrategias de mitigación y la implementación de tecnologías viables para proporcionar beneficios tanto económicos como sociales y el control de otros factores. Uno de los principales acuerdos de la convención fue el establecimiento de la celebración anual de la Conferencia de las Partes (COP), con el propósito de llevar a cabo las negociaciones pertinentes para cumplir con los objetivos de la CMNUCC. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2018)

Posteriormente, se firmó el Protocolo de Kyoto a finales de 1997, el cual es el instrumento operacional de la CMNUCC a través del cual se establecían compromisos jurídicamente vinculantes para limitar y reducir las emisiones de GEI de los países industrializados (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], s.f.-c). Este Protocolo se fundamentó en el principio de “responsabilidades comunes pero diferenciados y capacidades respectivas.

Durante la COP21 celebrada en París, Francia en diciembre de 2015, se aprobó el Acuerdo de París sobre Cambio Climático. En este nuevo acuerdo, jurídicamente vinculante, las naciones, tanto desarrolladas como en desarrollo, se comprometen a trabajar en conjunto para lograr el principal objetivo que es limitar el calentamiento global por debajo de 2 grados centígrados, preferiblemente a 1.5 en comparación con la línea base de los niveles preindustriales (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], s.f.-b). Su funcionamiento se da en un ciclo de cinco años de medidas climáticas progresivamente más ambiciosas llevadas a cabo por los países firmantes. Estas medidas se presentan en planes de acción climática conocidos como Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés).

Una NDC es un documento donde se establecen los compromisos de reducción de emisiones de GEI y las medidas de adaptación a los impactos del cambio climático.

Si bien las metas y acciones contenidas en una NDC están enfocadas a cumplir con la meta a largo plazo de combatir el cambio climático en concordancia con el Acuerdo de París, su contenido específico puede variar según las condiciones técnicas, capacidades y contexto de cada país (UNFCCC, 2024).

El acuerdo además estipula que las Partes firmantes deben proporcionar a la par de la comunicación de su NDC la información necesaria para mantener una claridad, transparencia y comprensión de esta.

No obstante, el Informe sobre la Brecha de Emisiones 2025 de la ONU, declaró que los compromisos actuales son muy inferiores a lo necesario para limitar el aumento de la temperatura global a los 1.5 grados previstos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2025).

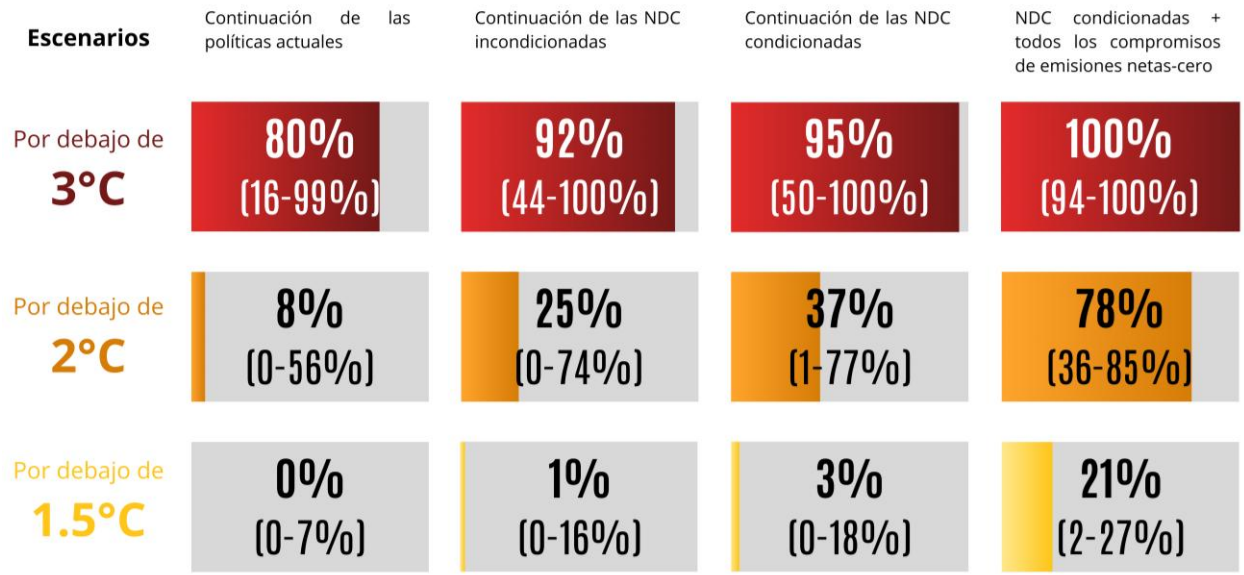
1.1.2 Metas condicionadas y no condicionadas

Las NDC distinguen entre metas no condicionadas y condicionadas. Las primeras corresponden a compromisos de mitigación que los países pueden implementar utilizando sus propios recursos nacionales, mientras que las metas condicionadas dependen del acceso a financiamiento internacional, transferencia de tecnología y apoyo en el desarrollo de capacidades. Esta diferenciación permite reflejar tanto el esfuerzo doméstico como el potencial adicional de mitigación sujeto a cooperación internacional (Rogelj et al., 2016)

La ONU en 2025 reportó que para 2030, 2035 y 2050, existe una brecha significativa entre las emisiones proyectadas bajo distintos escenarios de política y los niveles compatibles con las metas climáticas globales. En general, las políticas actuales conducen a los niveles más altos de emisiones (por ejemplo, 58 $GtCO_2e$ en 2030), mientras que la implementación de las NDC no condicionadas reduce parcialmente estas emisiones, y las NDC condicionadas logran reducciones adicionales (hasta 51 $GtCO_2e$ en 2030). Sin embargo, incluso bajo el escenario más ambicioso de NDC condicionadas, persisten brechas importantes frente a las trayectorias necesarias para limitar el calentamiento a 2.0 °C, 1.8 °C y especialmente 1.5 °C. Esta tendencia se mantiene en 2035, evidenciando que los compromisos actuales son insuficientes para cerrar la brecha de emisiones. Para 2050, aunque la combinación de NDC condicionadas y metas de carbono neutral reduce considerablemente las emisiones (19 $GtCO_2e$), aún existen incertidumbres amplias y posibles brechas respecto a los objetivos más estrictos. En conjunto, la Figura 1 demuestra que el cumplimiento de las metas climáticas internacionales requiere no solo la implementación plena de las NDC condicionadas, sino también un aumento sustancial en la ambición y el apoyo internacional para cerrar las brechas de mitigación.

La Figura 1 evidencia cómo la probabilidad de limitar el calentamiento global depende directamente del nivel de ambición de las políticas climáticas. Bajo el escenario de políticas actuales, existe una alta probabilidad (80%) de mantenerse por debajo de 3 °C, pero prácticamente nula (0%) de cumplir el objetivo más ambicioso de 1.5 °C. La implementación de las NDC no condicionadas mejora ligeramente estas probabilidades, especialmente para el umbral de 2 °C (25%), aunque sigue siendo insuficiente para 1.5 °C (1%). Cuando se consideran las NDC condicionadas, las probabilidades aumentan de manera más significativa (37% para 2 °C), reflejando el impacto del apoyo internacional en la ambición climática. Finalmente, el escenario que combina NDC condicionadas con compromisos de neutralidad de carbono muestra la mayor mejora, alcanzando un 78% de probabilidad de limitar el calentamiento a 2 °C y un 21% para 1.5 °C. En conjunto, la figura demuestra que, aunque los compromisos actuales representan avances progresivos, aún son insuficientes para garantizar el cumplimiento del objetivo más estricto del Acuerdo de París, lo que subraya la necesidad de incrementar la ambición y fortalecer la cooperación internacional.

Figura 1. Probabilidad de limitar el calentamiento global bajo diferentes escenarios climáticos.



Elaboración propia con datos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2025).

La CMNUCC define la mitigación del cambio climático como el conjunto de acciones orientadas a disminuir la concentración de GEI en la atmósfera, ya sea mediante la reducción de emisiones o el fortalecimiento de los sumideros de carbono, como los bosques (UNFCCC, s. f.-a). Dado que existe una relación directa entre el aumento de la temperatura media global y la acumulación de GEI, la mitigación constituye un eje central para limitar el calentamiento global.

En el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, las Partes están obligadas a formular e implementar programas acordes

con sus responsabilidades y capacidades, incorporando medidas que promuevan actividades económicas más limpias y desincentiven aquellas con altas emisiones. Estas acciones abarcan sectores clave como energía, transporte, industria, edificios, agricultura, silvicultura, uso de la tierra y gestión de residuos.

1.1.3 Política climática en México

La política climática en México se remonta a la firma del CMNUCC durante la Cumbre de Río en 1992 para abordar el cambio climático, la cual fue aprobada unánimemente por la Cámara de Senadores para ser ratificada ante la ONU en marzo de 1993 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2018). En 1998 México firmó el Protocolo de Kyoto, el cual fue ratificado tras la aprobación del Senado de la República en abril del año 2000 (Secretaría de Relaciones Exteriores [SRE], s. f.).

En abril de 2016, México firmó el Acuerdo de París durante una ceremonia de alto nivel celebrada para iniciar la firma del Acuerdo de París en el marco de la CMNUCC. Posteriormente, el instrumento fue aprobado por la Cámara de Senadores en septiembre del mismo año (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2021).

México se convirtió en la primera nación en desarrollo en promulgar, en 2012, una legislación específica en materia de cambio climático, la Ley General de Cambio Climático (LGCC) (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [Sedema], s.f.). Esta ley se estructura en títulos, capítulos y secciones que establecen las bases de la política nacional de cambio climático, incluyendo instrumentos de planeación como la Estrategia Nacional, el Programa y los programas estatales. Sus ejes principales son la mitigación (reducción de emisiones) y la adaptación (disminución de la vulnerabilidad y fortalecimiento de la resiliencia), que orientan todas las políticas, acciones y evaluaciones. Su objetivo es enfrentar el cambio climático mediante la reducción de gases de efecto invernadero, la protección de la población y los ecosistemas, y la transición hacia un desarrollo sustentable y de bajas emisiones de carbono (COFEPRIS, 2017).

Asimismo, en 2015 fue pionero al presentar su contribución prevista y determinada a nivel nacional (iNDC) ante la CMNUCC (SEMARNAT, 2015). En esta México estableció metas tanto en materia de mitigación como de adaptación, diferenciando en ambos casos entre compromisos condicionados y no condicionados.

En 2018, se reformó la LGCC con el propósito de integrar las metas, conceptos y principios derivados del tratado, reconociendo a la NDC como el instrumento rector del país en materia de compromisos de mitigación y adaptación frente al cambio climático, incluyendo los Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (GyCEI) (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2018).

Conforme a lo establecido por la CMNUCC, en 2020 México inició su primer ciclo de actualización con la presentación de su segunda NDC. Esta actualización fue resultado de un proceso amplio de participación y consulta que involucró a dependencias federales, gobiernos estatales, sector privado y organizaciones de la sociedad civil. Asimismo, se desarrollaron diálogos público-privados con representantes de los sectores contemplados en la NDC, así como con asociaciones vinculadas a derechos humanos, perspectiva de género y juventudes. El proceso avanzó a partir de una fase participativa que cumple con las obligaciones que tiene México bajo el Acuerdo de Escazú, la cual incluyó una consulta pública en línea, con el objetivo de promover la participación social en la formulación de la política climática y en la actualización de la contribución nacional (México ante el Cambio Climático, s. f.).

Esta primera actualización establecía un enfoque integral para articular a la adaptación y mitigación frente al cambio climático. El componente de adaptación se estructuraba en cinco ejes: (A) prevención y atención de impactos en población y territorio, enfocado en reducir vulnerabilidad social y riesgos; (B) sistemas productivos resilientes y seguridad alimentaria, orientado a prácticas sostenibles y adaptación del sector agropecuario; (C) conservación, restauración y uso sostenible de la biodiversidad, priorizando ecosistemas y servicios ecosistémicos; (D) gestión integrada de los recursos hídricos, centrada en el acceso, uso eficiente y resiliencia del agua; y (E) protección de infraestructura estratégica y patrimonio cultural, buscando fortalecer su resiliencia ante eventos climáticos. En el componente de mitigación, México estableció metas al 2030 respecto a un escenario tendencial (Business as Usual): un compromiso no condicionado de reducción del 22% de emisiones de GEI y 51% de carbono negro, financiado con recursos nacionales; y un compromiso condicionado de hasta 36% de GEI y 70% de carbono negro, sujeto a apoyo internacional en financiamiento, tecnología y capacidades. Estas metas se implementan mediante acciones sectoriales en energía, transporte, industria, agricultura, residuos y uso de suelo, destacando la integración de sinergias con adaptación y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (México ante el Cambio Climático, s. f.).

Sin embargo, esta primera NDC fue cuestionada sobre la insuficiencia de ambición y el carácter regresivo de esta versión comparada con la iNDC. De acuerdo con Greenpeace México, esta NDC no sólo no incrementaba el nivel de compromiso respecto a años anteriores, sino que incluso permitía mayores emisiones al elevar la línea base y eliminar elementos clave como el pico de emisiones y metas de largo plazo, lo que contravenía el principio de progresividad del Acuerdo de París (Greenpeace México, 2021). Además, se señaló la urgencia de fortalecer la ambición climática para cerrar la brecha entre las emisiones reales y la contribución justa de México frente al objetivo global de limitar el calentamiento a 1.5 °C, así como la necesidad de incorporar una mayor participación social y un enfoque de justicia climática (México ante el Cambio Climático, s. f.).

En este contexto, la NDC se actualizó en 2022, incrementando la ambición del componente de mitigación respecto a la versión de 2020. Mientras que esta última fortaleció principalmente la estructura metodológica, la transparencia y el componente de adaptación sin aumentar las metas cuantitativas de mitigación, la actualización de 2022 elevó la reducción no condicionada de gases de efecto invernadero del 22 % al 35 % para 2030 y el compromiso condicionado del 36 % al 40 %. Asimismo, incorporó mayor detalle en las medidas sectoriales y rutas de implementación, con acciones en sectores como energía, transporte y economía circular (SEMARNAT e INECC, 2022). Así, la NDC 2022 avanzó respecto a la de 2020 mediante el incremento de las metas de mitigación y una mayor definición de las acciones para su cumplimiento. La tercera NDC fue presentada en la COP30 en Belém, Brasil (SEMARNAT, 2025b). Esta presentó una hoja de ruta con horizonte a 2035 con el objetivo de fortalecer la acción climática al establecer por primera vez una meta absoluta y neta de emisiones alineada con la neutralidad en 2050. Además, refuerza la adaptación e incorpora componentes inéditos como Pérdidas y Daños, política climática transversal (género, derechos humanos y transición justa) y un entorno habilitador basado en financiamiento, tecnología y desarrollo de capacidades.

De acuerdo con Climate Action Tracker, proyecto científico independiente, que sigue el avance de la acción climática gubernamental y la compara con la meta del Acuerdo de París para limitar el aumento de la temperatura a por debajo de 2°C, la actualización de la NDC se caracterizó como Altamente Insuficiente (Climate Action Tracker, s. f.). Entre las principales razones para categorizarla de esta manera es que persisten contradicciones significativas, especialmente en el sector energético que es la principal fuente de emisiones, por tanto, el cumplimiento de sus metas depende de una transformación a nivel estructural hacia las energías renovables.

En la actualidad, México tiene un Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC), mecanismo establecido por la LGCC y formado con el objetivo de fomentar la coordinación y sinergias necesarias para atender de manera integral la vulnerabilidad y los riesgos del país, así como definir acciones prioritarias de mitigación y adaptación al cambio climático (DOF, 2018).

1.1.4 Medidas de mitigación del sector USCUSS

En el documento “Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030” publicado por el Gobierno de México en 2015, se reconoció la importancia del sector de uso del suelo, el cambio de uso del suelo y la silvicultura (USCUSS) para los cálculos de la NDC mexicana. En dicho documento, se describe al uso del suelo como la forma en que las sociedades destinan y transforman una superficie determinada, ya sea manteniendo su vocación como ecosistema natural o modificándola para actividades como la agricultura, ganadería, urbanización u otros usos productivos (SEMARNAT, 2015). Para México, el sector

AFOLU representa el 3er sector por emisiones de CO2eq (101 MtCO2eq, mientras que el 1er sector es energía con 425 MtCO2eq).

En el contexto climático de México, se reconoce como un sector estratégico para México debido a su doble papel en mitigación y adaptación (ver Tabla 1). Si bien las actividades asociadas a diferentes usos de suelo pueden generar emisiones de GEI, también pueden favorecer a su captura mediante conservación y restauración de la vegetación. La vegetación natural, a través de la fotosíntesis, actúa como sumidero de carbono al absorber CO_2 de la atmósfera, lo que otorga al sector un papel clave en el balance nacional de emisiones. En el caso de México, su amplia cobertura forestal permite que el sector presente un efecto neto de absorción (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2024). Esta capacidad puede fortalecerse mediante la ampliación y manejo adecuado de superficies con alto potencial de captura, como áreas reforestadas, plantaciones forestales, pastizales y tierras agrícolas manejadas de manera sostenible. Además de las acciones establecidas en las NDC, existen otros mecanismos e iniciativas que contribuyen al cumplimiento de las metas de mitigación y que pueden fortalecer el potencial de captura de carbono en el territorio nacional, como se muestra en la Tabla 2.

En este contexto, las cero emisiones netas se alcanzan cuando las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero liberadas a la atmósfera se equilibran con las remociones antropogénicas durante un periodo determinado. Alcanzar este balance requiere reducir sustancialmente las emisiones y compensar aquellas emisiones residuales mediante remociones de gases de efecto invernadero. El sector USCUSS desempeña un papel relevante en este proceso debido a su capacidad para actuar tanto como fuente de emisiones como sumidero de carbono, por lo que las transformaciones en el uso del suelo y la conservación de los ecosistemas adquieren especial importancia dentro de las estrategias orientadas a alcanzar emisiones netas cero.

En el caso de México, el Gobierno federal asumió el compromiso de alcanzar cero emisiones netas para 2050, anunciado en el marco de la 29.ª Conferencia de las Partes (COP29) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (SEMARNAT, 2024). Posteriormente, la Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC) 3.0 de México estableció para 2035 una meta de mitigación expresada en términos de emisiones netas, como parte de una trayectoria de largo plazo orientada hacia las cero emisiones netas a mediados de siglo (SEMARNAT, 2025).

Tabla 1. Estrategias de mitigación del sector USCUSS para las diferentes NDC de México.

Eje estratégico	NDC 2015	NDC 2022 (actualizada)	NDC 2025	Enfoque de mitigación
1. Enfoque sectorial USCUSS y uso del suelo	Reconocimiento del uso del suelo como sector prioritario por	SbN al centro de la NDC; conservación del capital	Ordenamiento territorial participativo;	Reconocimiento del sector como eje

	su potencial de mitigación y adaptación. México identifica al sector como sumidero neto de carbono, destacando la importancia de conservar la cubierta vegetal y frenar el cambio de uso del suelo. Se incluye el cambio de uso en la línea base, pero no las "permanencias".	biocultural; compromiso de cero deforestación neta.	reducción de presión antropogénica; producción libre de deforestación.	estructural de la mitigación nacional.
2. Manejo forestal y reducción de deforestación	Prioridad en detener la deforestación para evitar emisiones del escenario inercial. Mejorar manejo forestal y de suelos para incrementar absorciones más allá de la línea base.	Implementación de ENAREDD+ y meta de cero deforestación neta.	PSA; Manejo Forestal Sustentable; combate a tala ilegal; vigilancia y certificación.	Reducción directa de emisiones por deforestación y degradación.
3. Incremento de acervos de carbono	Incrementar superficies con alta capacidad de absorción: reforestación, plantaciones forestales, pastizales y tierras agrícolas bien manejadas.	Conservación y restauración mediante SbN como vía de captura adicional de carbono.	Regeneración natural asistida; enriquecimiento forestal; plantaciones comerciales sostenibles.	Aumento de absorciones forestales.
4. Conservación de biodiversidad y servicios ecosistémicos	Las acciones de mitigación en uso del suelo generan co-beneficios en biodiversidad, servicios ambientales y conservación de suelos.	Conservación del capital biocultural; economía solidaria; resiliencia comunitaria.	Fortalecimiento de ANP y ADVC con financiamiento y monitoreo.	Mitigación con co-beneficios ambientales y sociales.
5. Restauración y expansión territorial	Recuperación de superficies degradadas y manejo sostenible del territorio.	>2 millones ha nuevas ANP; 1 millón ha ADVC; 40,785 ha restauración.	Programa Nacional de Restauración; compensación de emisiones; agroforestería y silvopastoreo.	Consolidación y expansión de sumideros.
6. Carbono azul	—	Estrategia Nacional de Carbono Azul (manglares, pastos marinos y marismas).	Implementación formal e incremento de acervos en humedales costeros.	Captura en ecosistemas marino-costeros.
7. Sistemas productivos sostenibles	Tecnificación sustentable del campo;	Sembrando Vida; agroforestería; milpa intercalada;	Cadenas libres de deforestación; asistencia técnica	Integración mitigación–desarrollo rural.

	recuperación de pastizales; biodigestores en sector agropecuario.	Centros de Aprendizaje Campesino.	agroforestal; diversificación productiva sostenible.	

Fuente: Elaboración propia con información de SEMARNAT (2015), SEMARNAT e INECC (2022) y SEMARNAT (2025).

Tabla 2. Instrumentos aliados de las metas de mitigación del sector USCUSS para las diferentes NDC de México.

Instrumento	Medida	Objetivo
ENAREDD+	Política pública de manejo integral del territorio	Reducir emisiones por deforestación y degradación forestal
ENAREDD+	Desarrollo rural sustentable	Preservar acervos de carbono forestal
Sembrando Vida	Agroforestería, milpa con árboles frutales	Diversificar economía local y fomentar prácticas sustentables
Programa Nacional de Restauración Ambiental 2025-2030	Restaurar ecosistemas degradados	Hoja de ruta para restauración ambiental
Programa Nacional de Restauración Ambiental 2025-2030	Participación multisectorial	Detener y revertir pérdida de biodiversidad
Programa Estratégico Forestal para México 2025	Gestión sostenible de ecosistemas forestales	Promover producción forestal ecoeficiente

Fuente: Elaboración propia con información de CONAFOR (2012), Secretaría de Bienestar (2020), CONABIO (2025) y CONAFOR (2001).

1.2 Marco político de la Conservación

1.2.1 Contexto global

En el ámbito internacional, la gobernanza ambiental moderna se consolidó a partir de la Conferencia de Estocolmo de 1972, celebrada en Estocolmo, Suecia, donde se adoptó una declaración con 26 principios orientados a la protección del medio ambiente (Naciones Unidas, s. f.-b). Posteriormente, en 1982, la Asamblea General de la ONU aprobó la Carta Mundial de la Naturaleza, que estableció principios para la conservación de los ecosistemas, la protección de las especies y el respeto a los procesos naturales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2020).

En 1983 se creó la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, presidida por Gro Harlem Brundtland, cuyo informe Nuestro futuro común (1987) introdujo y difundió el concepto de desarrollo sostenible como eje integrador entre ambiente y desarrollo. En esta Comisión se definió la sostenibilidad como aquello que permite

“satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades propias” **(**World Commission on Environment and Development [WCED], 1987, p. 16, traducción propia).

Este enfoque se consolidó en 1992 durante la Cumbre de la Tierra, realizada en Río de Janeiro, donde se adoptaron la Declaración de Río y la Agenda 21, y se originaron tres instrumentos fundamentales para la biodiversidad y el desarrollo sostenible: el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, que constituyen la base del régimen ambiental internacional contemporáneo (Naciones Unidas, s. f.-a).

El CDB es un tratado internacional adoptado en 1992 por 196 países y vigente desde 1993, con el propósito principal de conservar la biodiversidad, el uso sostenible de sus componentes y la distribución justa y equitativa de los beneficios derivados de los recursos genéticos (Naciones Unidas, s.f.-c). Sus tres objetivos son:

- La conservación de la diversidad biológica;
- El uso sostenible de los componentes de la diversidad biológica
- La participación justa y equitativa de los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos.

El Acuerdo de Escazú es un tratado internacional vinculante adoptado en 2018 que garantiza en América Latina y el Caribe el acceso a la información, la participación pública y la justicia en asuntos ambientales (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], s. f.). Obliga a los Estados a generar y divulgar información transparente, oportuna y accesible; promover la participación efectiva en decisiones que afecten al medio ambiente; y garantizar mecanismos para impugnar decisiones, exigir la reparación de daños y asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental. Es el primer tratado mundial que protege explícitamente a las personas defensoras del medio ambiente, al exigir condiciones seguras para su labor. Asimismo, incorpora principios de transparencia, no regresión, progresividad, equidad intergeneracional y derechos humanos, y promueve el fortalecimiento de capacidades, la cooperación internacional y la inclusión de grupos vulnerables. Con ello, busca fortalecer la gobernanza y la democracia ambientales y contribuir al derecho a un medio ambiente sano.
Entre las 23 metas del Marco orientadas a la acción urgente hacia 2030 y contribuyendo a alcanzar los objetivos con resultados hacia 2050, destaca la Meta 3, mejor conocida como Meta 30x30, cuyo objetivo es garantizar que al menos un 30% de las zonas terrestres y de aguas continentales y de las zonas marinas y costeras se conserven y gestionen eficazmente (áreas naturales protegidas, conectividad, gobernanza y otras medidas efectivas de conservación basadas en áreas) (Convention on Biological Diversity [CBD], 2022).

1.2.2 Política de conservación en México

México concentra más del 10% de la biodiversidad mundial conocida, que comprende la variedad de ecosistemas, especies y diversidad genética (SEMARNAT, 2016). Aunque las comunidades indígenas han protegido ancestralmente los ecosistemas, la conservación formal del Estado inició en 1917 con el decreto del Parque Nacional Desierto de los Leones y avanzó mediante la participación del gobierno, la sociedad civil, la academia, organismos internacionales y comunidades locales (CONANP, 2018). Persisten desafíos para proteger el capital natural, por lo que es necesario fortalecer la colaboración entre sociedad y gobierno para preservar la biodiversidad y promover el uso sustentable de los recursos (CONANP, 2018).

México firmó el CDB en 1992 y lo ratificó en 1993 (CONABIO, 2024), asumiendo compromisos de conservación de la biodiversidad, uso sustentable de sus componentes y distribución justa y equitativa de los beneficios derivados de los recursos genéticos. Esto impulsó la necesidad de fortalecer las capacidades nacionales para generar y sistematizar información sobre biodiversidad y dar seguimiento a dichos compromisos.

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) se estableció por decreto presidencial en 1992 para generar, integrar y difundir conocimiento sobre la biodiversidad nacional y apoyar su conservación y uso sustentable (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 1992). Su información científica y técnica contribuye a la planeación y toma de decisiones ambientales. Asimismo, fue designada responsable del seguimiento técnico y científico de los trabajos y negociaciones del CDB, vinculando los compromisos internacionales con las acciones nacionales de conservación (CONABIO, 2024).

En este marco institucional, en junio del año 2000 se creó la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), con el objetivo de conservar el patrimonio natural de México y los procesos ecológicos asociados a las Áreas Naturales Protegidas (ANP) (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], s. f.). Actualmente, la CONANP administra 232 ANP de carácter federal, con información actualizada en 2025, cuya gestión busca integrar los objetivos de conservación con las necesidades y el bienestar de los pobladores y usuarios de estos territorios. Bajo este enfoque, las ANP constituyen espacios en los que la conservación de los ecosistemas y de la biodiversidad se vincula con acciones de manejo, participación social y aprovechamiento sustentable, con el propósito de fortalecer las iniciativas orientadas a la conservación y al manejo de los recursos naturales (ver Tabla 3).

La CONANP orienta su planeación mediante una visión de largo plazo hacia 2050, que reconoce a las ANP como prioridad nacional y plantea fortalecer las capacidades

técnicas y financieras para su gestión. Asimismo, promueve la participación social, las alianzas estratégicas y la gobernanza para conservar y usar sustentablemente los ecosistemas terrestres y marinos, vinculando su protección con una perspectiva territorial que trasciende las acciones inmediatas.

El artículo 44 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) estipula que las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son zonas del territorio nacional (en espacios marinos y terrestres) y aquellas sobre las que la Nación ejerce soberanía y jurisdicción, en las que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano, o que sus ecosistemas y funciones integrales requieren ser preservadas y restauradas, quedarán sujetas al régimen previsto en esta Ley y los demás ordenamientos aplicables (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente [LGEEPA], 2026).

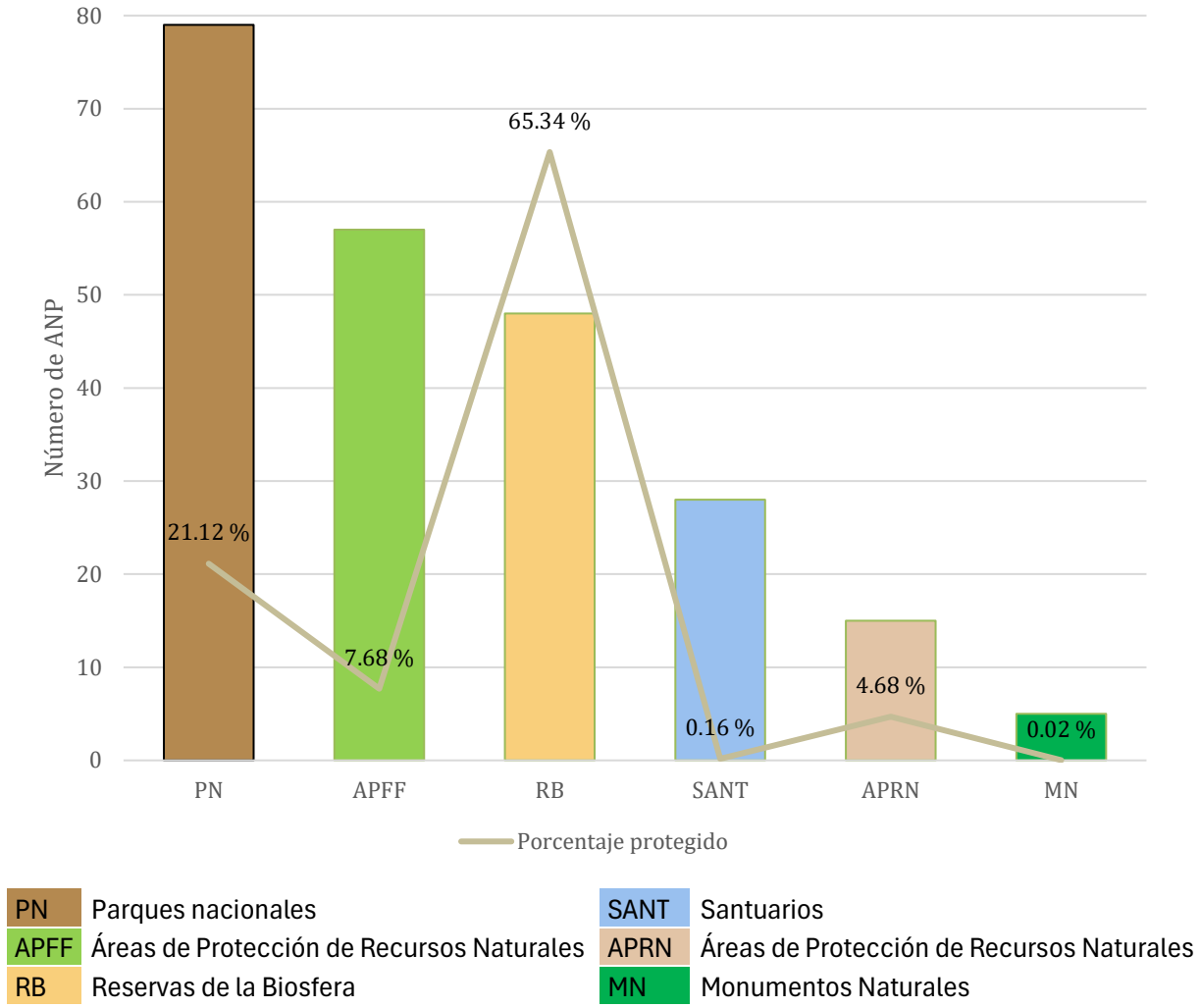
Tabla 3. Áreas Naturales Protegidas de carácter federal según su categoría de manejo

Categoría de manejo	Número de ANP por categoría	Superficie (ha)	Porcentaje total protegido (%)
APFF - Áreas de Protección de Flora y Fauna	57	7,530,550	7.68
APRN - Áreas de Protección de Recursos Naturales	15	4,585,287	4.68
MN - Monumentos Naturales	5	16,269	0.02
PN - Parques Nacionales	79	21,679,414	22.12
RB - Reservas de la Biósfera	48	64,033,711	65.34
SANT – Santuarios	28	155,488	0.16
Total	232	98,000,719.00	100

Fuente: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2025a). Numeralia de Áreas Naturales Protegidas. Recuperado de https://simec.conanp.gob.mx/numeralia.php

Las ANP se encuentran sujetas a diferentes categorías de manejo, las cuales responden a las características ecológicas del territorio y a los objetivos específicos de conservación establecidos para cada área. Estas categorías permiten establecer distintos enfoques de protección y manejo de los ecosistemas, considerando las condiciones particulares de cada sitio y las actividades que pueden desarrollarse dentro de sus límites. Por ello, conocer la distribución de las ANP de acuerdo con su categoría de manejo permite complementar la caracterización de estos instrumentos de conservación y dimensionar la composición del sistema de áreas protegidas a nivel nacional. La proporción que representa cada categoría respecto del total de ANP se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Porcentaje de Áreas Naturales Protegidas Federales protegidas según su categoría de manejo



Fuente: CONANP, (2025). Numeralia de Áreas Naturales Protegidas. https://simec.conanp.gob.mx/numeralia.php

Además de considerar la categoría de manejo de las Áreas Naturales Protegidas, es necesario dimensionar la extensión territorial que representan dentro del país. La superficie de las ANP constituye un indicador relevante para caracterizar el alcance espacial de las estrategias de conservación, ya que permite conocer qué proporción del territorio nacional se encuentra bajo algún esquema de protección federal. En este sentido, la superficie protegida puede analizarse de manera diferenciada entre los ámbitos terrestre y marino, debido a las características y extensión de cada uno. La superficie y proporción del territorio nacional comprendida dentro de las ANP federales se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Superficie protegida del territorio nacional en las ANP federales

Tipo de vegetación o ecosistema	Superficie dentro de las ANP (ha)	Porcentaje del total protegido por ANP federales (%)

Selva Perennifolia	2,903,428.73	2.96
Bosque Mesófilo de Montaña	284,669.00	0.29
Bosque de Encino	3,228,242.34	3.29
Otros tipos de vegetación	2,439,793.99	2.49
Matorral Xerófilo	8,007,039.00	8.17
Pastizal	676,975.00	0.69
Selva Caducifolia	2,541,645.28	2.59
Agroecosistemas	1,503,590.36	1.53
Manglar	472,274.00	0.48
Bosque de Coníferas	3,022,203.56	3.08
Vegetación Hidrófila	994,973.15	1.02
Sin Vegetación aparente	1,131,460.58	1.15
Mar Territorial	70,794,424.00	72.24
Total	98,000,719	100

Fuente: Elaboración propia con datos de CONANP (2025a).

Las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) son áreas naturales protegidas de competencia federal, sustentadas en la LGEEPA (artículos 46, fracción XI, y 47 al 55 BIS) (LGEEPA, 2026). Se establecen mediante un certificado emitido por la SEMARNAT, a través de la CONANP, a iniciativa de pueblos indígenas, organizaciones sociales, personas físicas o morales, públicas o privadas que destinan voluntariamente sus predios a la conservación. Su importancia se refleja en el número de áreas certificadas y la superficie destinada a la conservación, cuyos datos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Estadísticas generales de las ADVC certificadas en México

Número de ADVC	Superficie certificada (ha)	Entidades federativas
602	1,420,344.092492	29

Fuente: Elaboración propia con datos de CONANP (2025a).

De acuerdo con la CONANP (2025a), el organismo administra 232 ANP de carácter federal, que abarcan 98,000,719 hectáreas, y apoya a 602 ADVC, distribuidas en 29 entidades federativas. A partir de esta información se obtuvo la superficie total certificada de las ADVC presentada en la Tabla 5, mientras que la Tabla 6 muestra

su distribución entre los diferentes ecosistemas y las variaciones en la proporción de superficie destinada a la conservación.

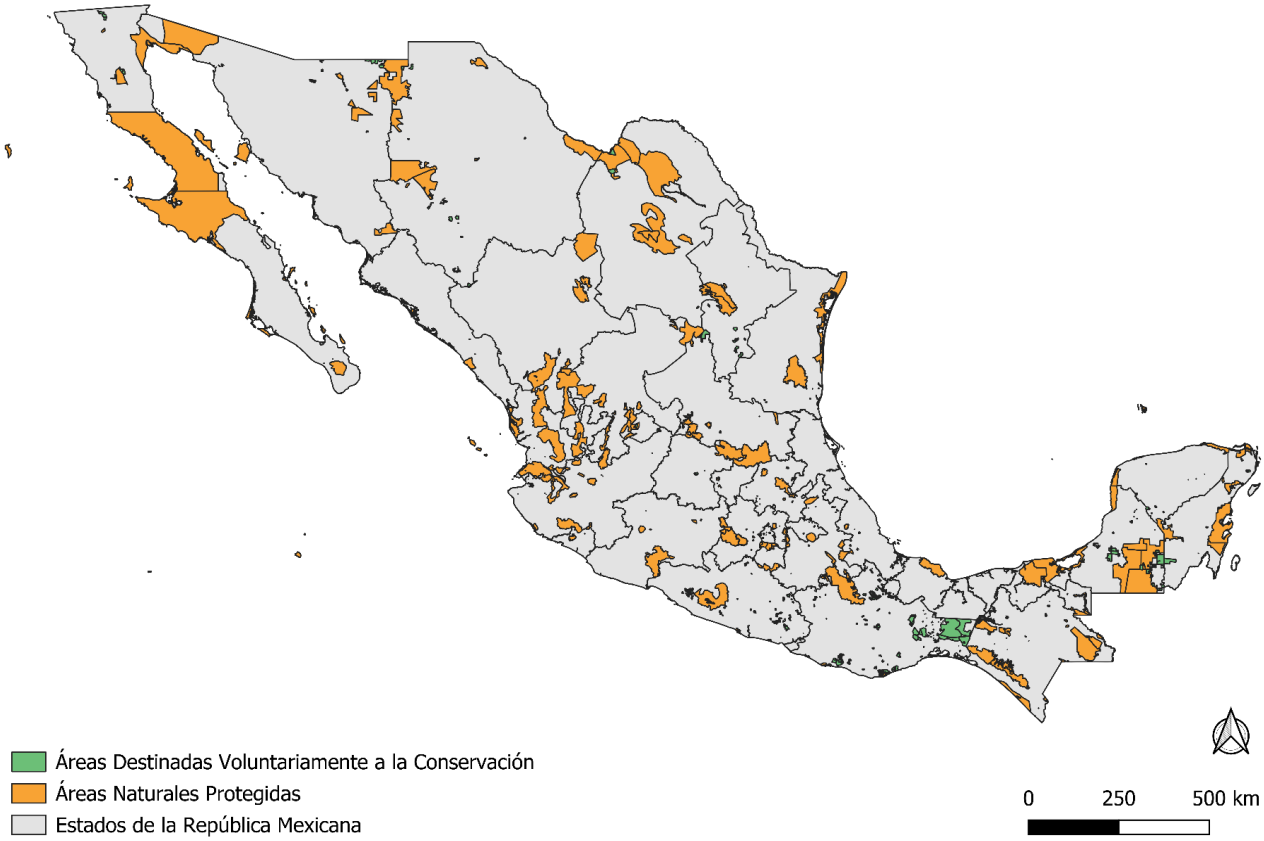
Tabla 6. Protección de ecosistemas por Área Destinada Voluntariamente a la Conservación

Ecosistema	Porcentaje
Agricultura y pastizales inducidos	3.61
Plantaciones forestales	0.05
Bosque de coníferas	18.49
Bosque de encino	7.20
Bosque mesófilo de montaña	6.40
Cuerpos de agua	0.07
Selva húmeda	40.32
Selva seca	9.90
Vegetación árida y semiárida	7.92
Vegetación Hidrófila	0.53
Vegetación riparia y de galería	0.06
Vegetación halófila y gipsófila	0.92
Vegetación costera	0.08
Manglar	0.12
Pastizales	4.33
Total	100 %

Fuente: Elaboración propia con datos de CONANP (2025a)

La distribución de las áreas destinadas a la conservación también puede analizarse desde una perspectiva espacial. La Figura 3 muestra la distribución conjunta de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) en el territorio nacional, permitiendo visualizar su presencia y extensión espacial.

Figura 3. Mapa de la distribución de Áreas Naturales Protegidas (naranja) y Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (verde) en México.



Elaboración propia con datos de CONANP (2025a)

La distribución espacial de las áreas destinadas a la conservación constituye un elemento relevante para caracterizar la presencia de estos instrumentos en el territorio nacional, ya que permite complementar la información presentada mediante las estadísticas generales de las ANP y ADVC. Considerar conjuntamente ambos instrumentos permite identificar la distribución de la superficie asociada a mecanismos de conservación entre las diferentes entidades federativas y observar las diferencias espaciales en su presencia. Esta representación permite contar con una referencia territorial para el análisis posterior de la relación entre las superficies destinadas a la conservación, los diferentes tipos de uso del suelo y vegetación y los escenarios de mitigación considerados en este estudio. En este sentido, la Figura 4 presenta la distribución a nivel estatal de la superficie asociada a ANP y ADVC, mediante la representación cartográfica de las áreas identificadas en la base de datos utilizada.

Figura 4. Mapa del área total protegida por instrumentos de conservación a nivel estatal.



Los gráficos circulares muestran la proporción del área total que está protegida bajo el instrumento de Área Natural Protegida (ANP, verde), Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC, rojo) y no protegidas (Gris) a nivel estado para el año 2025. Elaboración propia, datos obtenidos de CONANP (2025a).

La distribución espacial observada en la Figura 4 puede complementarse mediante la cuantificación de la superficie destinada a la conservación en cada entidad federativa. Para ello, se integró la superficie correspondiente a las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y a las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC), lo que permite identificar las diferencias existentes entre los estados en cuanto a la extensión territorial asociada a estos instrumentos. Esta información permite dimensionar de manera más precisa la distribución estatal de las superficies destinadas a la conservación y establecer una base para su posterior relación con las características de uso del suelo y vegetación. Los valores obtenidos para cada entidad federativa se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Superficie protegida por Áreas Naturales Protegidas o Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación por Estado.

ESTADO	ÁREA PROTEGIDA POR ANP (ha)	ÁREA PROTEGIDA POR ADVC (ha)
Aguascalientes	125,114.47	8,750.14
Baja California	2,955,464.56	56,333.92
Baja California Sur	2,422,121.36	9,550.65
Campeche	1,822,194.17	180,710.78
Chiapas	1,155,541.47	14,780.25
Chihuahua	1,621,904.76	49,042.91
Ciudad de México	9,485.90	-
Coahuila	2,326,798.30	34,104.98
Colima	56,298.03	138.44
Durango	1,041,831.08	7,122.02
Guanajuato	239,139.66	4,945.89
Guerrero	363,568.92	94,269.02
Hidalgo	132,388.33	3,102.93
Jalisco	687,989.61	8,565.75
México	278,889.22	2,572.11
Michoacán	333,748.46	164.33
Morelos	109,938.09	20.09

Nayarit	918,785.81	1,497.35
Nuevo León	291,338.21	33,810.42
Oaxaca	341,798.88	746,868.73
Puebla	259,365.13	3,022.89
Querétaro	383,699.99	-
Quintana Roo	725,114.28	50,454.24
San Luis Potosí	198,508.59	35,598.56
Sinaloa	92,440.10	2,556.22
Sonora	1,398,390.06	51,228.46
Tabasco	373,905.70	923.35
Tamaulipas	688,158.45	2,817.06
Tlaxcala	34,296.08	3,520.01
Veracruz	222,399.55	2,786.54
Yucatán	117,977.89	11,086.03
Zacatecas	753,631.81	0.01
Total	22,482,200.00	1,420,300.00

Fuente: Elaboración propia con datos de CONANP (2025a).

La CONABIO señala que las áreas protegidas son una herramienta de conservación que proporciona múltiples beneficios a escala local, regional, nacional y global (CONABIO, 2023). La Comisión Mundial de Áreas Protegidas (WCPA, por sus siglas en inglés) las define como espacios destinados a la conservación de la naturaleza, sus servicios ecosistémicos y valores culturales (CONABIO, s. f.-a). En este contexto, la superficie destinada a la conservación mediante ANP y ADVC presenta una

distribución diferenciada entre las entidades federativas, como se muestra en la Tabla 7.

La importancia de estos instrumentos también se relaciona con los compromisos internacionales de protección de los ecosistemas y la biodiversidad. El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 15 se enfoca en la gestión sostenible de los bosques, la lucha contra la desertificación, la degradación de las tierras y la pérdida de biodiversidad. A principios de 2024, los bosques cubrían alrededor del 31 % de la superficie terrestre y albergaban aproximadamente el 80 % de las especies terrestres de animales, plantas e insectos. Asimismo, la deforestación contribuye a la degradación de los suelos, la pérdida de especies y la intensificación de los efectos del cambio climático (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2024).

Datos de 2020 reportados en la Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) mostraron que la proporción de bosques en áreas protegidas y bajo planes de gestión a largo plazo iba en aumento o permanecía estable a nivel mundial y en la mayoría de las regiones del mundo (FAO, 2020). La ONU determina que una adecuada gestión de las áreas protegidas contribuye a la salud de los ecosistemas y de las personas, razones fundamentales para que las comunidades locales se involucren en su desarrollo y gestión (ONU, 2024).

El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) financió el Proyecto “Planeación Nacional Colaborativa para un Enfoque de Conservación Inclusivo y Efectivo para Cumplir o Superar la Meta 3 del Marco Mundial de Biodiversidad Kunming-Montreal", para apoyar el desarrollo de iniciativas para superar la Meta 3 en países como México (CONABIO, s. f.-c). En México, se busca aplicar la Meta 30x30 como un mínimo y no un límite máximo de conservación, por lo que el proyecto fue liderado por la SEMARNAT como el punto focal político y la CONANP como el técnico teniendo el apoyo del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) como agencia implementadora (SEMARNAT, 2025a).

Según el Resumen Ejecutivo de la Hoja de Ruta de México para cumplir o superar la Meta 3 del Marco Mundial de Biodiversidad Kunming-Montreal, en 2025, el 78 % de los ecosistemas marinos, acuáticos y terrestres del país se encuentran subrepresentados dentro de los polígonos de las áreas federales y estatales, lo que indica que menos del 30 % de la superficie correspondiente a cada tipo de ecosistema se encuentra protegida (SEMARNAT, 2025a). Esta situación evidencia que, aunque México cuenta con una importante superficie bajo algún esquema de protección, su distribución no es homogénea entre los distintos ecosistemas. Por ello, la superficie protegida puede analizarse de manera diferenciada según su carácter terrestre o marino, así como en función de su proporción respecto de la superficie protegida mediante Áreas Naturales Protegidas (ANP) federales y del territorio nacional. Estos

elementos permiten caracterizar la cobertura actual de conservación y contextualizar los resultados presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Distribución de la superficie protegida por ANP federales según tipo de superficie

Tipo de superficie	Superficie (ha)	Porcentaje total protegido por ANP federales (%)	Porcentaje del territorio nacional (%)	Datos adicionales
Terrestres	23,096,563.19	23.57	11.76 de la superficie terrestre nacional	192 ANP cuentan con superficie exclusivamente terrestre
Marinos	74,904,155.39	76.43	23.78 de la superficie marina del territorio nacional	9 ANP cuentan con superficie exclusivamente marina 31 ANP cuentan con una superficie costero-marino
Total	98,000,719	100		

Fuente: (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2025). Numeralia de Áreas Naturales Protegidas. https://simec.conanp.gob.mx/numeralia.php

Durante las últimas décadas, una de las principales problemáticas que han dificultado el cumplimiento de los objetivos de conservación ha sido la persistencia de la deforestación, con un promedio de 208 850 hectáreas por año (ha/año) (CONAFOR, 2022). Esta situación evidencia la necesidad de analizar no sólo la magnitud de las transformaciones que ocurren en el territorio, sino también su distribución espacial y su relación con otros componentes ambientales. En este sentido, el estudio del territorio constituye un elemento fundamental para comprender las implicaciones que los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal pueden tener sobre los objetivos de conservación y las estrategias de mitigación del cambio climático. Para ello, resulta necesario contar con herramientas que permitan integrar y analizar espacialmente información ambiental de distintas fuentes.

Capítulo 2: Territorio y mitigación climática

2.1 Sistemas de Información Geográfica como herramienta para la gestión ambiental

Para comprender adecuadamente los procesos ambientales y hacer un análisis completo de estos, se deben estudiar no sólo los fenómenos que ocurren dentro de un territorio, sino también la forma en que estos se distribuyen espacialmente y la interacción existente entre sus componentes físicos, biológicos y sociales. En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han consolidado como una de las herramientas más útiles para el estudio del territorio, al permitir integrar información proveniente de múltiples fuentes dentro de un mismo entorno de análisis. La fortaleza de esta herramienta recae en su capacidad para combinar bases de datos con información cartográfica, facilitando la representación espacial de variables ambientales y favoreciendo la generación de información útil para la planeación, el monitoreo y la toma de decisiones.

El Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2017) definió a un SIG como un software especializado que permite la creación de consultas interactivas, la integración de información geográfica, el análisis de datos espaciales y la representación cartográfica de información georreferenciada asociada a un territorio. A diferencia de un sistema convencional de almacenamiento de información, un SIG incorpora el componente espacial como un elemento fundamental del análisis, permitiendo relacionar la ubicación geográfica de los fenómenos con sus características físicas, ambientales o socioeconómicas. Así, los SIG se han convertido en una herramienta de apoyo para identificar patrones espaciales, evaluar cambios en el territorio y generar escenarios que respaldan la toma de decisiones.

La utilidad de los SIG ha aumentado significativamente durante las últimas décadas debido al crecimiento en la disponibilidad de información geoespacial proveniente de sensores remotos, imágenes satelitales, levantamientos topográficos y bases de datos oficiales. El poder integrar estas fuentes de información permite construir modelos espaciales que facilitan la comprensión de procesos complejos, como la expansión urbana, la fragmentación de ecosistemas, el cambio de uso del suelo, la pérdida de cobertura forestal y la distribución de los recursos naturales. En consecuencia, los SIG se han convertido en plataformas integrales de análisis territorial.

En el ámbito de la gestión ambiental, el empleo de los Sistemas de Información Geográfica resulta indispensable para la elaboración de diagnósticos ambientales, el diseño de estrategias de conservación y el seguimiento de políticas públicas orientadas al aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. La capacidad de integrar información ambiental de diferentes escalas espaciales y momentos

temporales permite una evaluación más precisa de las condiciones de los ecosistemas, así como analizar su evolución a través del tiempo, proporcionando evidencia científica para fortalecer los procesos de planeación territorial.

En México, estas herramientas se han incorporado de manera sistemática en diversas instituciones, como la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). Este organismo destaca el uso de los SIG como una tecnología estratégica para la protección de la biodiversidad a través de la integración de información espacial necesaria para apoyar la administración y conservación de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Área Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) (CONANP, 2016). Estas herramientas facilitan la delimitación territorial de las áreas protegidas, la identificación de hábitats prioritarios para la conservación de especies, la evaluación de amenazas derivadas de la deforestación y la urbanización, así como la generación de información cartográfica que respalda la toma de decisiones en materia de conservación. El uso constante de estas tecnologías para ampliar las capacidades geoespaciales de la CONANP responde a problemáticas ambientales cada vez más complejas, entre las que destacan la pérdida de la biodiversidad, la degradación de los ecosistemas y los efectos del cambio climático. En este sentido, el uso de estos recursos tecnológicos permite que las decisiones que se toman relacionadas con la conservación sean fundamentadas en evidencia científica, favoreciendo acciones de manejo y restauración.

A principios de la década de los 2000 la CONANP implementó por primera vez una plataforma geográfica con la versión inicial de su SIG (CONANP, s.f.-b). Esta plataforma tiene como objetivo principal el facilitar el acceso a información cartográfica y documental sobre las áreas protegidas federales mediante internet, acercando esta información a instituciones gubernamentales, investigadores, organizaciones civiles, academia y público general interesado en el tema. En la actualidad, el SIG de la CONANP es uno de los principales repositorios nacionales de información relacionada con las ANP y ADVC. A través de esta plataforma es posible consultar documentación técnica y jurídica, incluyendo las fichas del Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación (SIMEC), los decretos de creación de cada ANP, los Programas de Conservación y Manejo, cartografía temática y archivos geoespaciales en formatos SHP y KML, compatibles con la mayoría de los programas especializados en análisis espacial (CONANP, s. f.-b). La disponibilidad de esta información ha favorecido la generación de estudios ambientales y proporciona insumos indispensables para investigaciones relacionadas con la conservación, la restauración ecológica y el ordenamiento territorial (CONANP, s.f.-b).

El uso de los SIG en investigaciones orientadas al análisis del cambio de uso del suelo y de la dinámica del carbono es capaz de integrar información cartográfica con bases de datos ambientales que permite identificar la distribución espacial de los diferentes tipos de cobertura vegetal, cuantificar las transformaciones ocurridas en distintos

periodos y relacionar dichos cambios con variables ecológicas, climáticas y socioeconómicas. Los SIG permiten establecer un vínculo entre la información territorial y los modelos que buscan explicar la respuesta de los ecosistemas frente a las actividades humanas y el cambio climático (SGM, 2017).

En la presente investigación, los Sistemas de Información Geográfica son el fundamento para integrar información cartográfica proveniente de diferentes fuentes oficiales y analizar la evolución de los usos del suelo como variable asociada al almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales. La información espacial obtenida mediante estas herramientas permitirá sustentar los análisis posteriores relacionados con los cambios de cobertura vegetal y la simulación de escenarios mediante modelos de evaluación integrada. En consecuencia, el empleo de los SIG no constituye únicamente un recurso cartográfico, sino el eje metodológico sobre el cual se estructura el análisis espacial desarrollado en esta investigación.

Como parte de esta base de información territorial, uno de los conjuntos de datos más importantes disponibles en México corresponde a la cartografía de Uso del Suelo y Vegetación elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021a). Debido a su cobertura nacional, continuidad metodológica y compatibilidad con los Sistemas de Información Geográfica, esta información constituye un insumo fundamental para analizar la evolución de la cobertura terrestre y evaluar los procesos de cambio de uso del suelo, aspecto que se desarrolla en el siguiente apartado.

2.2 Cartografía de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI como base para el análisis territorial

El conocimiento de la distribución y evolución de la cobertura terrestre es fundamental para comprender las transformaciones ambientales de un territorio. Los cambios en el uso del suelo reflejan la interacción entre las actividades humanas y los ecosistemas, por lo que su análisis permite identificar tendencias como la expansión agrícola, el crecimiento urbano y la pérdida de cobertura forestal. Para ello, es indispensable contar con información cartográfica confiable y homogénea.

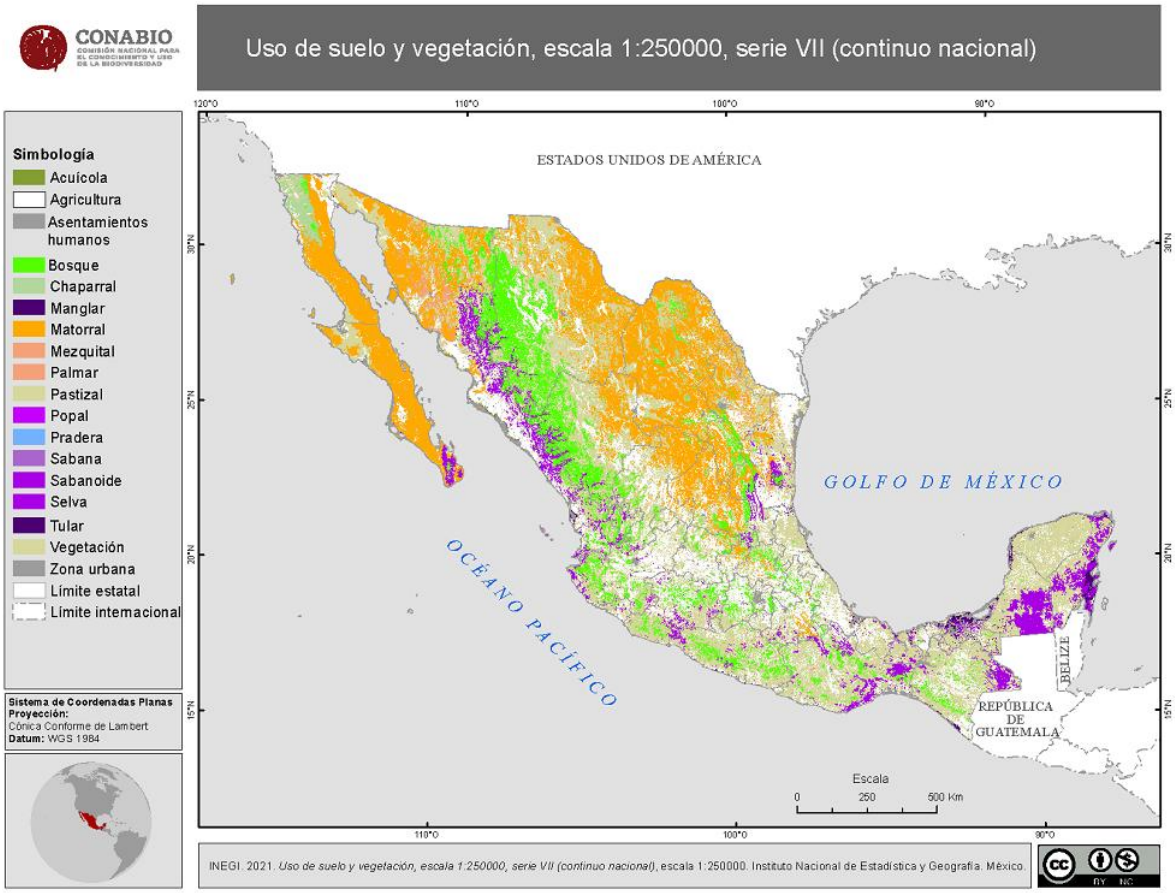
En México, la principal fuente oficial de información sobre cobertura y uso del suelo es la cartografía de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI. Desde la Serie I hasta la Serie VII, publicada en 2021 con información de año base 2018, estas series han documentado la cobertura y el uso del suelo en México (INEGI, 2021a).

La información generada por el INEGI ha sido utilizada durante más de cuatro décadas por instituciones gubernamentales, centros de investigación y organizaciones nacionales e internacionales debido a su consistencia técnica y cobertura nacional. Su aplicación se extiende a la elaboración de inventarios forestales, estudios ecológicos, evaluaciones de impacto ambiental, programas de ordenamiento territorial y proyectos de monitoreo de los recursos naturales. Asimismo, esta cartografía ha servido como insumo para iniciativas de colaboración

entre instituciones nacionales, como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), así como para proyectos internacionales relacionados con el monitoreo de la cobertura terrestre en América del Norte.

Una de las principales fortalezas de la Serie VII, cuya cobertura se puede observar en la Figura 5, radica en que proporciona información homogénea para la totalidad del territorio nacional bajo una misma metodología de clasificación. Esta característica permite comparar diferentes regiones del país utilizando criterios cartográficos uniformes, reduciendo la incertidumbre asociada a la integración de información proveniente de diversas fuentes. Además, la disponibilidad de siete series históricas facilita el análisis de la dinámica espacial de los ecosistemas y la identificación de tendencias de cambio que difícilmente podrían observarse mediante estudios aislados (INEGI, 2021a).

Figura 5. Uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, Serie VII (Continuo Nacional)



Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021a).

La evolución de esta cartografía también ha estado acompañada por avances en la infraestructura nacional de información geográfica. Su incorporación al Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG) favoreció la transición hacia formatos digitales interoperables con Sistemas de Información Geográfica,

incrementando significativamente la accesibilidad, actualización y aprovechamiento de los datos espaciales. A partir de la Serie VI, la estructura conceptual de la base de datos permitió fortalecer su vinculación con sistemas especializados, entre ellos el Sistema Nacional de Información Forestal y el Sistema Nacional de Información para el Desarrollo Rural Sustentable, ampliando las posibilidades de integración con otros conjuntos de información ambiental (INEGI, 2021b).

La clasificación del INEGI separa la información en tres grandes grupos: la cobertura ecológica, florística y fisonómica; las superficies destinadas a actividades agrícolas, pecuarias y forestales; y diversos rasgos complementarios del territorio. Esta organización permite representar la diversidad de ecosistemas presentes en México mediante criterios estandarizados que facilitan el análisis espacial y temporal de la vegetación. Entre las categorías cartográficas reconocidas se encuentran los bosques de coníferas y encinos, las selvas perennifolias, subcaducifolias y caducifolias, el bosque mesófilo de montaña, los matorrales xerófilos, los pastizales, la vegetación hidrófila y la vegetación inducida, entre otros tipos de cobertura (INEGI, 2021b).

La clasificación empleada por el INEGI para la serie VII se sustenta en los trabajos desarrollados por Rzedowski, Miranda y Hernández, cuyas propuestas han sido adaptadas a criterios cartográficos compatibles con una escala de 1:250 000 (INEGI, 2021b). Esta estandarización metodológica permite que la información pueda integrarse con otros productos geoespaciales, como imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, inventarios forestales y bases de datos climáticas, fortaleciendo el análisis interdisciplinario del territorio.

Desde la perspectiva del cambio climático, la información de uso del suelo adquiere una relevancia adicional debido a que las modificaciones en la cobertura vegetal alteran directamente la capacidad de los ecosistemas para almacenar carbono. La conversión de bosques hacia usos agrícolas o urbanos reduce las reservas de carbono presentes en la biomasa y en el suelo, mientras que los procesos de restauración y recuperación de la vegetación favorecen nuevamente la captura de dióxido de carbono atmosférico. Por ello, el análisis de la dinámica del uso del suelo constituye una herramienta fundamental para estimar emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero asociadas al sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (LULUCF).

En la presente investigación, la cartografía de Uso del Suelo y Vegetación Serie VII constituye la principal fuente de información espacial para caracterizar la cobertura terrestre y analizar la distribución de los ecosistemas forestales. Su integración con Sistemas de Información Geográfica permitirá identificar espacialmente los tipos de vegetación presentes en el área de estudio y servirá como base para el análisis de los procesos biogeoquímicos relacionados con el almacenamiento de carbono y la simulación de escenarios de mitigación mediante modelos de evaluación integrada.

De esta manera, la Serie VII del INEGI se destaca como una herramienta estratégica para comprender la dinámica ambiental del territorio mexicano y proporcionar información confiable que sustente la formulación de políticas públicas orientadas a la conservación de los ecosistemas y al cumplimiento de los compromisos nacionales en materia de cambio climático (INEGI, 2021b).

2.3 Dinámica del carbono en los ecosistemas forestales

El carbono es uno de los elementos fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres debido a su participación en los procesos biológicos, químicos y físicos que regulan el intercambio de materia y energía entre la atmósfera, la biosfera, la hidrosfera y la litosfera. Estos intercambios conforman el ciclo del carbono, un proceso dinámico mediante el cual este elemento circula continuamente entre diferentes reservorios naturales. En condiciones de equilibrio, los flujos de carbono entre dichos reservorios mantienen concentraciones relativamente estables de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera (Riebeek, 2011); sin embargo, las actividades humanas han modificado significativamente este equilibrio durante las últimas décadas.

Dentro del ciclo global del carbono, los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental debido a su capacidad para capturar dióxido de carbono atmosférico mediante la fotosíntesis y almacenarlo en diferentes compartimentos del ecosistema. El carbono fijado por la vegetación puede permanecer durante periodos variables en hojas, ramas, troncos, raíces, hojarasca y materia orgánica del suelo, constituyendo uno de los principales reservorios terrestres de carbono. La magnitud de este almacenamiento depende de factores como el tipo de vegetación, las condiciones climáticas, la productividad biológica, las características edáficas y el régimen de perturbaciones naturales o antrópicas (CONAFOR, 2023).

La importancia de los ecosistemas forestales dentro de las estrategias de mitigación del cambio climático comenzó a adquirir relevancia en el ámbito internacional a partir de la adopción del Protocolo de Kioto. Posteriormente, durante la Séptima Conferencia de las Partes (COP7), celebrada en Marrakech en 2001, se establecieron definiciones, modalidades y lineamientos para incorporar las actividades relacionadas con el uso de la tierra, el cambio de uso del suelo y la silvicultura dentro de los mecanismos internacionales de contabilidad del (Conferencia de las Partes, 2002).. Estos acuerdos reconocieron la importancia de los ecosistemas terrestres en la regulación del clima, aunque los límites cuantitativos aplicables a la gestión forestal fueron establecidos únicamente para los países incluidos en el Anexo I del Protocolo. Debido a que México no forma parte de dicho anexo (Conferencia de las Partes, 2002), las absorciones derivadas de la gestión forestal no quedaron sujetas a esos límites bajo este régimen internacional.

Desde una perspectiva ecológica, el comportamiento de un ecosistema respecto al carbono puede describirse mediante el balance existente entre las entradas y salidas

de este elemento. Cuando la cantidad de carbono capturada mediante la fotosíntesis supera las pérdidas ocasionadas por respiración, descomposición, incendios u otros procesos, el ecosistema funciona como un sumidero de carbono. En contraste, cuando las emisiones son superiores a la captura, el ecosistema se convierte en una fuente de carbono hacia la atmósfera (NASA Science Editorial Team, 2018).

Los ecosistemas terrestres desempeñan un papel fundamental en el ciclo global del carbono al absorber y almacenar parte del CO_2 presente en la atmósfera. En particular, los bosques constituyen uno de los principales reservorios terrestres de carbono. De acuerdo con la FAO, en 2020 los bosques del mundo almacenaban aproximadamente 662 gigatoneladas de carbono, distribuidas principalmente entre la biomasa viva y la materia orgánica del suelo (FAO, 2020). Estimaciones más recientes, basadas en datos de campo y observaciones satelitales, también muestran que los bosques poseen un importante potencial adicional de almacenamiento de carbono, asociado principalmente con la conservación, restauración y recuperación de ecosistemas forestales degradados (Mo et al., 2023). Estas evidencias resaltan la importancia de la conservación y el manejo sostenible de los bosques como componentes de las estrategias de mitigación del cambio climático. Una parte importante de este carbono se concentra en regiones de altas latitudes debido al almacenamiento existente en los suelos y en zonas con permafrost, donde las bajas temperaturas reducen las tasas de descomposición de la materia orgánica (FAO, 2020).

No obstante, la función de los bosques como sumideros de carbono no permanece constante. La capacidad de almacenamiento puede modificarse como consecuencia de cambios en las condiciones climáticas, alteraciones en el régimen hidrológico, incremento de la temperatura, reducción de la precipitación o modificaciones en la frecuencia e intensidad de las perturbaciones naturales (McDowell et al., 2020). En regiones donde la disponibilidad de agua disminuye o donde el estrés térmico aumenta, la productividad forestal puede reducirse significativamente, limitando la capacidad de los ecosistemas para capturar carbono atmosférico. En contraste, algunas zonas actualmente limitadas por bajas temperaturas podrían experimentar incrementos en la productividad vegetal bajo determinados escenarios climáticos, aunque los efectos globales de estas respuestas continúan siendo objeto de investigación. Además, bajo un escenario de alto calentamiento, se ha proyectado una posible saturación del sumidero terrestre de carbono (Shi et al., 2021).

El incremento sostenido de la concentración atmosférica de dióxido de carbono refleja el desequilibrio existente entre las emisiones antropogénicas y la capacidad de absorción de los sistemas naturales (Friedlingstein et al., 2023). Este comportamiento se encuentra influenciado por procesos biológicos como la fotosíntesis, la respiración de plantas y microorganismos, la descomposición de la materia orgánica y la ocurrencia de incendios forestales. Bajo condiciones naturales, estos procesos tienden a mantener un equilibrio dinámico; sin embargo, la deforestación, el cambio

de uso del suelo y la degradación de los ecosistemas alteran dicho balance al reducir la cantidad de carbono almacenado y favorecer su liberación hacia la atmósfera.

La permanencia del carbono dentro de los ecosistemas forestales también presenta una gran variabilidad temporal. La permanencia del carbono en los ecosistemas forestales varía según el reservorio. En hojas y raíces finas suele ser relativamente breve; en la madera y en algunas fracciones de la materia orgánica del suelo puede extenderse durante décadas o siglos. Ciertas fracciones estables del suelo pueden persistir aún más tiempo. Por ello, la capacidad de los bosques para mantener carbono almacenado depende tanto de las características de estos reservorios como de las condiciones ambientales y las perturbaciones a las que están expuestos (IPCC, 2000).

Entre los factores que pueden reducir el carbono almacenado en los ecosistemas forestales se encuentran las sequías, los incendios, las plagas y los cambios de uso del suelo. Su efecto depende de la frecuencia e intensidad de las perturbaciones, así como de la capacidad de recuperación del bosque. Por ello, las condiciones climáticas y el manejo del territorio influyen en la permanencia de estos almacenes de carbono (McDowell et al., 2020). Asimismo, procesos asociados al cambio climático, como el aumento del ozono troposférico, la deposición de nitrógeno y el deshielo del permafrost, pueden modificar significativamente la capacidad de los ecosistemas para almacenar carbono y generar retroalimentaciones positivas que intensifiquen el calentamiento global. Estas interacciones evidencian que el papel de los bosques dentro del ciclo del carbono depende de una compleja combinación de procesos ecológicos y climáticos, así como de las decisiones relacionadas con el manejo del territorio.

En este contexto, el análisis del cambio de uso del suelo adquiere una relevancia estratégica, ya que las modificaciones en la cobertura vegetal alteran directamente la capacidad de los ecosistemas para capturar y almacenar carbono. La conversión de áreas forestales hacia usos agrícolas, pecuarios o urbanos disminuye los almacenes de carbono existentes y genera emisiones adicionales de gases de efecto invernadero, mientras que las acciones de restauración ecológica y reforestación pueden favorecer nuevamente la captura de carbono atmosférico. Por ello, comprender la dinámica del carbono constituye un paso indispensable para estimar el impacto de diferentes escenarios de uso del suelo sobre las emisiones nacionales y evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación.

La comprensión de estos procesos biogeoquímicos proporciona el fundamento científico para estimar las emisiones y absorciones asociadas a los diferentes tipos de vegetación. En consecuencia, el siguiente apartado aborda el concepto de factores de emisión y su aplicación en la cuantificación del carbono almacenado y liberado por los ecosistemas forestales.

2.4 Factores de emisión y almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales

La cuantificación de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero constituye uno de los elementos centrales para evaluar el impacto de las actividades humanas sobre el sistema climático. En el sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (LULUCF), estas estimaciones dependen en gran medida de la capacidad para determinar la cantidad de carbono almacenado en los distintos ecosistemas y los cambios que experimentan como consecuencia de las modificaciones en la cobertura vegetal. Para ello, se emplean factores de emisión, los cuales representan coeficientes que permiten estimar la cantidad de carbono liberado o capturado por unidad de actividad.

Los factores de emisión constituyen un componente esencial para la elaboración de inventarios de gases de efecto invernadero, ya que relacionan actividades como la deforestación, degradación forestal, reforestación o incremento de biomasa con la cantidad de carbono emitido o secuestrado. Su aplicación permite transformar la información espacial obtenida mediante SIG y cartografía de uso del suelo en estimaciones cuantitativas de emisiones y absorciones, vinculando el análisis territorial con la evaluación climática.

La magnitud de estos factores depende de variables como el tipo de vegetación, composición florística, densidad de biomasa, características del suelo, condiciones climáticas y prácticas de manejo forestal. Por ello, los ecosistemas presentan diferentes capacidades de almacenamiento de carbono y requieren factores específicos para obtener estimaciones representativas.

En los ecosistemas forestales, algunos mantienen elevadas tasas de captura de carbono, mientras que otros pueden convertirse temporalmente en fuentes de emisiones debido a incendios, cambios de uso del suelo o degradación. Por esta razón, la estimación de emisiones debe considerar tanto las pérdidas como las ganancias de carbono derivadas de la dinámica natural y de las actividades humanas.

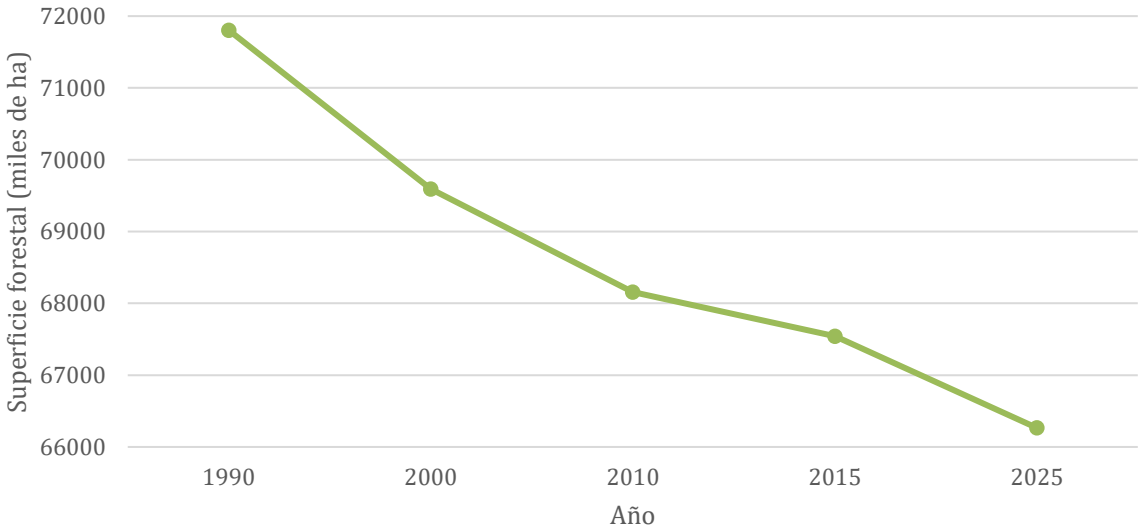
La relevancia de estos procesos puede observarse a escala global. De acuerdo con la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2025 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la superficie forestal mundial alcanzó aproximadamente 4 140 millones de hectáreas, lo que representa cerca del 32 % de la superficie terrestre (FAO, 2025). Estos ecosistemas constituyen uno de los principales reservorios de carbono del planeta y desempeñan un papel esencial en la regulación del clima mediante la captura de dióxido de carbono atmosférico.

En América del Norte y Centroamérica, la superficie forestal pasó de aproximadamente 771.4 millones de hectáreas en 1990 a 776.2 millones en 2025, lo que representa un ligero aumento neto durante el periodo. Esta tendencia regional no fue uniforme entre los países que la integran (FAO, 2025). Esta tendencia evidencia

la presión que continúan enfrentando los ecosistemas forestales y resalta la necesidad de fortalecer las estrategias de conservación y restauración.

A diferencia de la tendencia neta regional, en México la superficie forestal disminuyó de 71.8 millones de hectáreas en 1990 a 66.3 millones en 2025, lo que representa una reducción cercana a 5.5 millones de hectáreas en un periodo de treinta y cinco años (FAO, 2025). Aunque la tasa anual de pérdida forestal ha mostrado una disminución respecto a décadas anteriores, el cambio continúa representando un reto importante para la conservación de los ecosistemas y el cumplimiento de los compromisos nacionales de mitigación del cambio climático.

Figura 6. Evolución de la superficie forestal de México (1990–2025)



Fuente: Elaboración propia con información de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2025 (FAO, 2025).

La evolución temporal de estos datos permite observar una disminución continua de la cobertura forestal nacional, aunque con una reducción gradual en la velocidad de pérdida. Este comportamiento puede apreciarse con mayor claridad al analizar el cambio neto anual de superficie forestal.

Tabla 9. Cambio neto anual de la superficie forestal en México

Periodo	Cambio neto (miles de ha/año)	Variación (%)
1990–2000	-221.0	-0.31
2000–2015	-136.7	-0.20
2015–2025	-127.8	-0.19

Fuente: Elaboración propia con información de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2025 (FAO, 2025).

La disminución observada en la tasa anual de pérdida forestal constituye un indicador positivo; sin embargo, no implica que el proceso de transformación del territorio haya sido detenido. La persistencia de pérdidas netas de superficie forestal continúa afectando la capacidad de los ecosistemas para almacenar carbono y conservar la biodiversidad, por lo que resulta indispensable evaluar las consecuencias de estos cambios mediante herramientas que integren información espacial, ecológica y climática.

En este contexto, los factores de emisión adquieren una importancia estratégica dentro de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), ya que permiten cuantificar el efecto que diferentes escenarios de manejo del territorio tienen sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. La incorporación de estos coeficientes en modelos de simulación facilita la evaluación de políticas de conservación, restauración y reforestación, proporcionando información útil para estimar el potencial de mitigación asociado a distintas estrategias de uso del suelo.

Pan et al. (2011) destacan la contribución de los bosques al sumidero global de carbono. Para estimar las emisiones y absorciones asociadas con cambios en el uso del suelo, es necesario combinar información sobre superficies y cambios en las reservas de carbono con los factores correspondientes a cada categoría y método de cálculo (IPCC, 2006). Por ello, la estimación de factores de emisión específicos para cada tipo de vegetación representa un requisito indispensable para generar inventarios confiables y desarrollar modelos que permitan evaluar de manera objetiva las implicaciones climáticas del cambio de uso del suelo. Desde esta perspectiva, los factores de emisión no deben entenderse únicamente como coeficientes de cálculo, sino como herramientas que vinculan la información ecológica con la toma de decisiones en materia de política climática.

La utilización de estos factores constituye el punto de partida para los modelos de evaluación integrada, los cuales permiten analizar cómo diferentes escenarios socioeconómicos y de cambio de uso del suelo modifican la dinámica del carbono y las emisiones futuras. Por ello, el siguiente apartado aborda la importancia de los modelos de evaluación integrada como herramientas para analizar estrategias de mitigación del cambio climático.

2.5 Modelos de evaluación integrada para el análisis del cambio climático

La mitigación del cambio climático es uno de los principales objetivos y desafíos para los científicos y la política pública del siglo XXI. El diseño de estrategias eficaces requiere una comprensión de la interacción existente entre los sistemas naturales y las actividades humanas, así como una evaluación de las posibles consecuencias en las tres esferas de la sustentabilidad (ambiental, económica y social) derivadas de distintas decisiones de manejo del territorio. La complejidad de estas interacciones en las últimas décadas ha favorecido el uso de modelos de evaluación integrada (IAM,

por sus siglas en inglés), los cuales permiten analizar de manera simultánea los procesos biofísicos y socioeconómicos involucrados en el cambio climático.

Los modelos de evaluación integrada constituyen herramientas computacionales diseñadas para representar la interacción entre los sistemas energético, económico, agrícola, terrestre y climático. A diferencia de los modelos sectoriales, estos integran múltiples componentes dentro de un mismo marco analítico, lo que permite evaluar cómo una modificación en un sector puede generar efectos sobre los demás. Esta capacidad resulta especialmente útil para analizar políticas públicas orientadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ya que permite estimar sus impactos potenciales antes de su implementación.

En el contexto del uso del suelo, los modelos de evaluación integrada han adquirido una importancia creciente debido a que la dinámica de los ecosistemas terrestres influye directamente sobre el ciclo global del carbono. Tradicionalmente, algunos modelos representaban los sumideros terrestres de carbono como sistemas relativamente estáticos; sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que esta aproximación puede conducir a estimaciones poco precisas de las emisiones futuras. De acuerdo con Zhang y Chen (2025), la capacidad de almacenamiento de carbono de los ecosistemas cambia continuamente en respuesta a factores climáticos, ecológicos y de manejo del territorio, por lo que estas retroalimentaciones deben incorporarse explícitamente en los modelos utilizados para apoyar la formulación de políticas climáticas.

La incorporación de estas dinámicas resulta fundamental para representar de manera adecuada la interacción entre el clima y la biosfera. Zhang y Chen (2025) señalan que la planificación del uso del suelo debe considerar las retroalimentaciones existentes entre la cobertura vegetal, el almacenamiento de carbono y las condiciones climáticas futuras, ya que los cambios en cualquiera de estos componentes pueden modificar significativamente la capacidad de mitigación de los ecosistemas. En consecuencia, los modelos modernos buscan representar estos procesos de forma dinámica, evitando simplificaciones que puedan subestimar o sobreestimar el potencial de captura de carbono.

La relevancia de este enfoque se encuentra respaldada por la evidencia científica reciente. Los bosques cubren aproximadamente una tercera parte de la superficie terrestre (FAO, 2025). Además, constituyen un sumidero importante de carbono a escala mundial (Pan et al., 2024). La respuesta de la productividad vegetal a la temperatura varía entre biomasa y puede cambiar a medida que continúa el calentamiento (Huang et al., 2019; Zhang et al., 2022). Asimismo, aunque el sumidero forestal mundial se ha mantenido durante las últimas décadas, presenta diferencias entre regiones (Pan et al., 2024).

Los efectos del cambio climático sobre la productividad forestal no serán uniformes. En algunos bosques boreales, el calentamiento se ha asociado con un aumento del

crecimiento, aunque esta respuesta puede cambiar conforme aumenten las temperaturas (Kauppi et al., 2014; Zhang et al., 2022). Por otra parte, las proyecciones para biomas tropicales muestran posibles pérdidas de biomasa asociadas con cambios en la temperatura y la disponibilidad de agua (Uribe et al., 2023). Estas diferencias justifican considerar las respuestas regionales de la vegetación al evaluar escenarios futuros.

Las modificaciones en la productividad forestal repercuten directamente sobre el almacenamiento de carbono y, en consecuencia, sobre las estrategias de mitigación disponibles para cada país. Los cambios en la biomasa y en la superficie forestal alteran la cantidad total de carbono retenido en los ecosistemas, modificando también la superficie necesaria para alcanzar determinados objetivos climáticos. Asimismo, estas transformaciones generan competencia entre distintos usos del suelo, como la agricultura, la producción forestal, la expansión urbana y la conservación de los ecosistemas, lo que obliga a evaluar cuidadosamente las implicaciones de cada alternativa de manejo territorial. En particular, las proyecciones del sumidero forestal dependen de supuestos sobre la demanda de madera, las prácticas de manejo forestal y las políticas de carbono (Daigneault et al., 2022).

En este sentido, Luo et al. (2025) demostraron que la dinámica del carbono forestal constituye un factor determinante en la evolución futura del uso del suelo. Sus resultados indican que las proyecciones territoriales no deben depender únicamente de variables socioeconómicas o climáticas, sino incorporar también la capacidad de respuesta de los ecosistemas frente a distintas condiciones ambientales. Para ello, los autores incorporaron a GCAM cambios proyectados en el carbono forestal mediante un modelo de la biosfera terrestre y compararon sus efectos sobre el uso y la cobertura del suelo bajo distintos escenarios climáticos y socioeconómicos. Sus resultados muestran que representar estos cambios puede modificar las proyecciones de superficie destinadas a bosques, pastizales y cultivos (Luo et al., 2025).

La incorporación de estas herramientas representa un avance significativo para la planeación ambiental, ya que permite analizar simultáneamente la evolución del uso del suelo, la dinámica del carbono y las trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero bajo distintos escenarios de desarrollo. En lugar de evaluar únicamente las condiciones actuales del territorio, los modelos de evaluación integrada ofrecen la posibilidad de explorar escenarios futuros y estimar las consecuencias potenciales de diferentes estrategias de conservación, restauración y aprovechamiento de los recursos naturales.

Para la presente investigación, los modelos de evaluación integrada constituyen el marco conceptual que permitirá relacionar la información espacial obtenida mediante Sistemas de Información Geográfica con escenarios prospectivos de cambio de uso del suelo y almacenamiento de carbono. Entre estos modelos destaca el Global Change Analysis Model (GCAM), debido a su capacidad para representar la interacción entre los sistemas económico, energético, agrícola y terrestre. Por ello, el

siguiente apartado describe la estructura, funcionamiento y aplicaciones de este modelo en el análisis de estrategias de mitigación del cambio climático.

2.6 Global Change Analysis Model (GCAM) y su aplicación en el análisis del uso del suelo

La creciente complejidad de los problemas ambientales ha impulsado el desarrollo de herramientas capaces de representar de manera integrada las interacciones entre los sistemas naturales y las actividades humanas. Entre estas herramientas, el GCAM se ha consolidado como uno de los modelos de evaluación integrada más utilizados para analizar escenarios de cambio climático, uso del suelo, producción agrícola, disponibilidad de agua y transición energética. Su principal fortaleza radica en la capacidad de simular, dentro de un mismo marco metodológico, las relaciones existentes entre los sistemas económico, energético, agrícola y terrestre, permitiendo evaluar las consecuencias de diferentes políticas públicas sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y la evolución futura del territorio (Calvin et al., 2019).

GCAM fue desarrollado con el propósito de representar de manera consistente la interacción entre los principales componentes del sistema terrestre y las actividades humanas. El modelo integra procesos relacionados con el crecimiento económico, la demanda energética, la producción agrícola, el uso del suelo, los recursos hídricos y el sistema climático, permitiendo analizar cómo las modificaciones en uno de estos sectores repercuten sobre los demás (Calvin et al., 2019). Esta aproximación sistémica constituye una de sus principales ventajas frente a modelos sectoriales que analizan cada componente de forma independiente.

De acuerdo con Calvin et al. (2019), GCAM se calibra utilizando información correspondiente al periodo histórico con el propósito de reproducir el comportamiento observado de los diferentes sistemas antes de generar escenarios prospectivos. Posteriormente, el modelo realiza simulaciones en intervalos de cinco años, proyectando la evolución de variables económicas, demográficas, energéticas y ambientales bajo distintos supuestos de desarrollo. Esta metodología permite evaluar los efectos potenciales de diversas políticas de mitigación y comparar escenarios alternativos de uso del suelo y emisiones de gases de efecto invernadero.

Uno de los aspectos más relevantes de GCAM es la resolución espacial empleada para representar el sistema terrestre. En GCAM v7, el sistema económico y energético se representa mediante 32 regiones geopolíticas; el sistema terrestre se divide en 384 subregiones y el componente hídrico considera 235 cuencas hidrográficas (Joint Global Change Research Institute [JGCRI], s. f.-b). Esta estructura espacial permite incorporar diferencias regionales en disponibilidad de recursos, condiciones climáticas, productividad agrícola y cobertura vegetal, proporcionando una representación más realista de los procesos que afectan el uso del suelo.

La integración del componente territorial dentro de GCAM resulta especialmente relevante para investigaciones relacionadas con el cambio de uso del suelo y la dinámica del carbono. Las modificaciones en la cobertura vegetal alteran simultáneamente la producción agrícola, el almacenamiento de carbono, la demanda de recursos naturales y las emisiones de gases de efecto invernadero. Debido a estas interacciones, el modelo permite analizar cómo distintas estrategias de manejo territorial influyen sobre los objetivos de mitigación climática y cómo estas decisiones repercuten en otros sectores del sistema socioambiental.

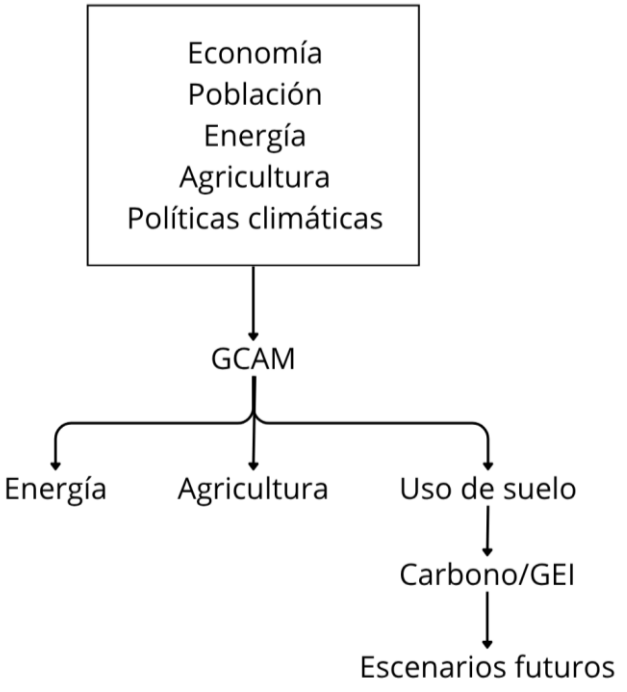
Diversos estudios han demostrado la utilidad de GCAM para evaluar estrategias basadas en soluciones naturales. Di Vittorio et al. (2014) analizaron la representación de la forestación en un sistema que acopla GCAM con un modelo del sistema terrestre. Al incorporar una mayor superficie forestada en el escenario estudiado, obtuvieron un aumento del carbono almacenado en la vegetación y una menor concentración atmosférica de CO_2 respecto de la simulación que no reproducía esa forestación. El estudio muestra la importancia de representar de forma consistente los cambios de cobertura terrestre al evaluar escenarios climáticos.

No obstante, la confiabilidad de estos escenarios depende de la calidad de la información utilizada para representar las condiciones biofísicas del territorio. En este sentido, Roebroek et al. (2025) desarrollaron mapas de cobertura arbórea potencial bajo condiciones climáticas actuales y futuras mediante observaciones satelitales y variables ambientales. En esta investigación, esa información se considera un ejemplo de restricción biofísica que podría contrastarse con escenarios de expansión forestal generados por modelos como GCAM, para evaluar si las superficies proyectadas son compatibles con el potencial ecológico del territorio.

La incorporación de restricciones biofísicas representa un avance importante dentro de los modelos de evaluación integrada, ya que reconoce que la disponibilidad de tierra para actividades de restauración no depende únicamente de variables económicas o demográficas, sino también de las características ambientales propias de cada región. La integración de cartografía temática, información climática y modelos de simulación permite generar escenarios de uso del suelo más consistentes con las condiciones reales del territorio, fortaleciendo el proceso de toma de decisiones.

En esta investigación, GCAM proporciona escenarios futuros de superficie por categoría de uso del suelo, mientras que los Sistemas de Información Geográfica permiten caracterizar espacialmente la cobertura vegetal y las áreas de conservación. La integración de ambos tipos de información sirve de base para analizar la relación entre las estrategias de mitigación y los objetivos de conservación ambiental en México. Asimismo, el modelo facilita el análisis de la interacción entre variables ambientales y socioeconómicas, aspecto indispensable para comprender la evolución futura del territorio bajo distintos escenarios de política climática, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Funcionamiento del Modelo GCAM.



Fuente: Elaboración propia con base en Calvin et al. (2019).

La aplicación de modelos como GCAM resulta especialmente pertinente en el contexto de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional, ya que permite evaluar cuantitativamente el efecto de diferentes alternativas de manejo del territorio sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y el almacenamiento de carbono. Esta capacidad convierte al modelo en una herramienta de apoyo para la formulación de políticas públicas orientadas a la mitigación del cambio climático y al aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

En conjunto, la integración de Sistemas de Información Geográfica, cartografía de uso del suelo, información sobre la dinámica del carbono y modelos de evaluación integrada constituye un marco metodológico robusto para analizar la relación entre los cambios en la cobertura terrestre y las estrategias de mitigación del cambio climático. Este enfoque interdisciplinario permite trascender el análisis descriptivo del territorio y avanzar hacia la construcción de escenarios prospectivos que apoyen la toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica.

Tabla 10. Comparación de modelos de evaluación integrada para el análisis de mitigación climática y uso del suelo

Modelo	Institución desarrolladora	Principales componentes	Funcionamiento del modelo	Limitaciones
GCAM	Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)	Energía, economía, uso del suelo, agricultura, agua y clima	Integra explícitamente energía, economía y uso del suelo, y permite analizar	Proyecta superficies por categoría de uso del suelo y subregión, pero sus resultados no

			escenarios de mitigación con cambios en la cobertura y uso del suelo.	identifican por sí solos las parcelas donde ocurren los cambios. Para representar transiciones espaciales se requiere un procedimiento adicional.
IMAGE	PBL Netherlands Environmental Assessment Agency	Energía, uso del suelo, biodiversidad y clima	Integra escenarios de uso y cobertura del suelo con componentes de clima, manejo forestal y biodiversidad; genera información espacial en cuadrículas que puede emplearse para analizar cambios territoriales.	Las proyecciones de uso del suelo y biodiversidad dependen de supuestos sobre demanda agrícola y asignación territorial; su incertidumbre aumenta cuanto más largo es el horizonte del escenario.
MESSAGE-GLOBIOM	International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)	Sistema energético, agricultura, silvicultura y cambio climático	Acopla un modelo energético con GLOBIOM, que representa la competencia entre agricultura, silvicultura y bioenergía por el uso del suelo. Puede incorporar restricciones biofísicas y, junto con G4M, proyectar cambios forestales espacialmente explícitos.	En la versión documentada, GLOBIOM trabaja con intervalos de diez años; comparar sus resultados con escenarios evaluados cada cinco años requeriría ajustar la resolución temporal del análisis.
REMIND-MAgPIE	Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)	Economía, energía, agricultura y uso del suelo	Acopla REMIND, que representa la economía y el sistema energético, con MAgPIE, que simula la dinámica del uso del suelo bajo restricciones biofísicas y socioeconómicas.	En la versión descrita por Hilaire y Bertram (2020), el componente económico REMIND utiliza once regiones mundiales. Un análisis económico específico de

			Permite estudiar las interacciones entre energía, tierra, emisiones y objetivos climáticos.	México requeriría una desagregación o adaptación adicional.

Fuente: Elaboración propia con base en Calvin et al. (2019), PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (s. f.), International Institute for Applied Systems Analysis (s. f.) y Hilaire y Bertram (2020).

Como se observa en la Tabla 10, todos los modelos de evaluación integrada comparten el objetivo de representar las interacciones entre los sistemas humanos y naturales; sin embargo, difieren en la forma en que representan los procesos biofísicos y socioeconómicos. Mientras que modelos como MESSAGE-GLOBIOM priorizan la optimización del sistema energético y REMIND-MAgPIE enfatiza el análisis macroeconómico de largo plazo, GCAM incorpora de manera explícita la interacción entre el uso del suelo, la agricultura, el sistema energético y el ciclo del carbono. Esta característica resulta especialmente relevante para la presente investigación, cuyo objetivo consiste en analizar la relación entre los cambios en la cobertura terrestre y el potencial de mitigación asociado a diferentes escenarios de uso del suelo.

Asimismo, GCAM ha sido ampliamente utilizado en evaluaciones internacionales sobre cambio climático y en investigaciones relacionadas con las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), lo que proporciona un marco metodológico sólido y ampliamente validado para el desarrollo de escenarios prospectivos.

2.7 Interacción entre estrategias de mitigación y conservación del territorio

Las estrategias de mitigación del cambio climático relacionadas con el uso del suelo se encuentran estrechamente vinculadas con los procesos de conservación de los ecosistemas, debido a que ambas dependen de la disponibilidad, distribución y manejo del territorio. La reducción de emisiones y el incremento del almacenamiento de carbono pueden requerir modificaciones en la superficie destinada a actividades agrícolas, pecuarias, forestales o de restauración, por lo que las medidas orientadas a alcanzar objetivos climáticos pueden generar cambios sobre otros componentes ambientales del territorio.

Los ecosistemas terrestres desempeñan un papel relevante en esta relación debido a su capacidad para almacenar carbono y proporcionar diversos servicios ecosistémicos. La conservación de la cobertura vegetal puede contribuir al mantenimiento de las reservas de carbono, mientras que la restauración de áreas degradadas puede incrementar el almacenamiento de este elemento. Sin embargo, las estrategias de mitigación basadas en el territorio también pueden implicar una redistribución de las superficies entre diferentes categorías de uso del suelo. Por ello,

la contribución climática de una estrategia no depende únicamente de la cantidad de carbono que puede almacenar, sino también de las transformaciones territoriales que requiere para su implementación.

Esta relación adquiere particular importancia cuando las estrategias de mitigación involucran superficies que presentan otros valores ambientales. Un incremento en la superficie destinada a determinados usos o coberturas no implica necesariamente un incremento equivalente en la conservación de los ecosistemas, de la misma manera que una reducción de una categoría de uso del suelo no permite, por sí sola, determinar la pérdida de un área de importancia para la conservación. La interpretación de estos cambios requiere considerar las características ambientales y territoriales de las superficies involucradas y su relación con los objetivos de conservación establecidos para el territorio.

En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica proporcionan las herramientas necesarias para integrar espacialmente la información sobre uso del suelo, cobertura vegetal y áreas destinadas a la conservación. La superposición de estas capas permite identificar las relaciones espaciales entre las superficies proyectadas bajo diferentes escenarios y los elementos territoriales relevantes para la conservación. De esta manera, la información cartográfica permite caracterizar dónde se encuentran las coberturas y las áreas de conservación, mientras que los escenarios de GCAM permiten estimar cuánto cambia la superficie de cada categoría. Para ubicar espacialmente las transformaciones proyectadas se requiere un procedimiento adicional de asignación espacial.

Los modelos de evaluación integrada complementan este análisis al permitir representar la evolución futura del territorio bajo diferentes escenarios de desarrollo y mitigación. En particular, GCAM incorpora el uso del suelo dentro de un sistema que relaciona las actividades agrícolas, forestales y energéticas con las emisiones y el almacenamiento de carbono. Como se señaló anteriormente, el modelo permite simular modificaciones en la distribución de las categorías de uso del suelo bajo distintos supuestos socioeconómicos y climáticos, generando escenarios que pueden ser posteriormente contrastados con información espacial del territorio mexicano.

Por lo tanto, la evaluación de las estrategias de mitigación requiere considerar simultáneamente su dimensión climática y territorial. El análisis conjunto de los cambios proyectados en el uso del suelo y de los elementos asociados con la conservación permite identificar posibles relaciones de compatibilidad, coincidencia o tensión entre ambos objetivos. Este enfoque permite evitar que el cumplimiento de una meta de mitigación sea interpretado de manera aislada, sin considerar las implicaciones que las transformaciones territoriales asociadas podrían tener sobre los ecosistemas y las superficies de interés para la conservación.

En la presente investigación, esta interacción constituye el vínculo conceptual entre los escenarios de mitigación simulados mediante GCAM y el análisis espacial de los

elementos de conservación ambiental en México. A partir de la integración de información cartográfica y escenarios prospectivos de uso del suelo, se busca evaluar el grado de consistencia entre las transformaciones territoriales asociadas con las estrategias de mitigación y los objetivos de conservación ambiental en un horizonte de largo plazo. De esta manera, el análisis permite abordar la mitigación climática no únicamente desde la perspectiva de la reducción de emisiones, sino también desde sus posibles implicaciones sobre la estructura y conservación del territorio.

Para llevar a cabo este análisis, fue necesario integrar y procesar información geoespacial proveniente de distintas fuentes oficiales, así como establecer una correspondencia entre las categorías de uso del suelo empleadas por GCAM y las representadas en la cartografía nacional. El procedimiento metodológico empleado para construir esta base de información e integrarla con los escenarios de GCAM se describe en el capítulo 3.

Capítulo 3: Metodología para Integrar y procesar información geoespacial para el análisis con GCAM

3.1 Fuentes de información geoespacial

La presente investigación se desarrolló a partir de la integración de información geoespacial proveniente de diversas fuentes oficiales, con el propósito de construir una base de datos espacial que permitiera relacionar los escenarios de cambio de uso del suelo generados mediante el Global Change Analysis Model (GCAM, por sus siglas en inglés) con la distribución territorial de las principales figuras de conservación en México.

La información de uso del suelo y vegetación se obtuvo del Geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), del cual se descargó la Serie VII de Uso del Suelo y Vegetación (USV), elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en formato vectorial y a escala 1:250 000 (INEGI, 2017, 2021a). Asimismo, se obtuvo la cartografía de la división política estatal y el mapa Ecorregiones terrestres de México de 2008, a escala 1:1 000 000, para incorporar información administrativa y ecológica al análisis espacial (Instituto Nacional de Estadística y Geografía et al., 2008).

Con el objetivo de vincular la información territorial nacional con las unidades de análisis empleadas por GCAM, se incorporó la regionalización espacial utilizada por dicho modelo. Esta permitió relacionar las coberturas terrestres nacionales con los escenarios de cambio de uso del suelo simulados mediante GCAM.

La información relativa a las figuras de conservación se obtuvo del Sistema de Información Geográfica de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), del cual se descargaron las capas vectoriales correspondientes a las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y a las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC), actualizadas al año 2025. Estas capas permitieron incorporar al análisis la distribución espacial de las principales figuras de conservación consideradas en esta investigación.

La selección de estas fuentes respondió a la necesidad de integrar distintas dimensiones del territorio en una misma unidad de análisis, de manera que fuera posible relacionar las categorías de uso del suelo y vegetación con su contexto ecológico, administrativo y de conservación, así como con las unidades espaciales utilizadas por GCAM. En la Tabla 1l1 se resumen las fuentes de información empleadas, sus principales características y su función dentro del análisis.

En conjunto, estas bases de datos proporcionaron la información necesaria para construir una base geoespacial integrada que reúne atributos territoriales, ecológicos, administrativos y de conservación, y que constituyó el principal insumo para el procesamiento espacial desarrollado en esta investigación.

Tabla 11. Fuentes de información utilizadas para la construcción de la base geoespacial.

Fuente	Información	Escala/Formato	Uso en la investigación
CONABIO–INEGI	Serie VII de Uso del Suelo y Vegetación	Vectorial, 1:250 000	Cobertura terrestre
CONABIO–INEGI	División política estatal	Vectorial, 1:250 000	Referencia administrativa
CONABIO	Ecorregiones terrestres de México	Vectorial	Regionalización ecológica
GCAM	Regionalización del modelo	Vectorial	Vinculación con escenarios
CONANP	ANP	Vectorial	Conservación
CONANP	ADVC	Vectorial	Conservación

Fuente: Elaboración propia con información de CONABIO (2025), INEGI et al. (2008), CONANP (2025a) y GCAM (2025).

3.2 Integración y procesamiento de la información geoespacial

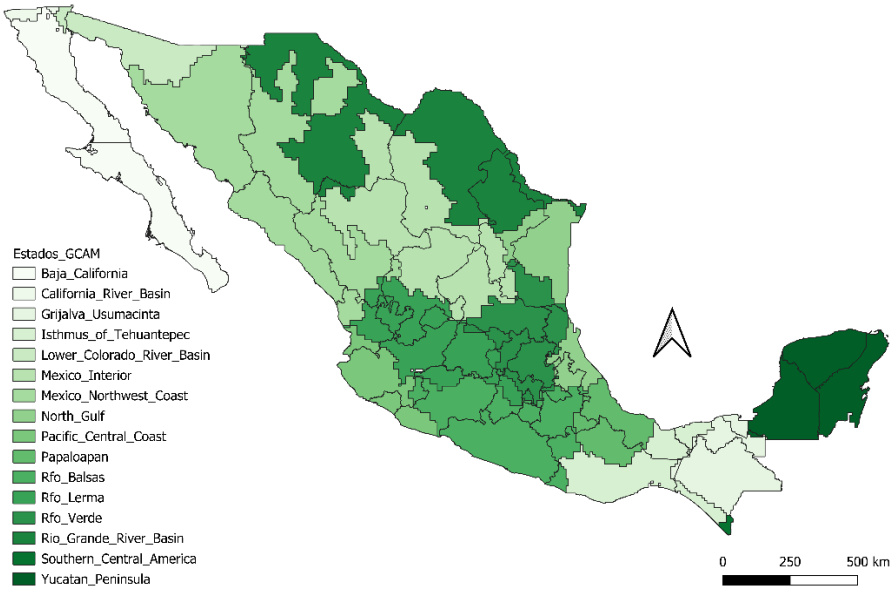
La integración y procesamiento de la información geoespacial se realizó mediante el software QGIS (versión 3.34), utilizando herramientas de geoprocesamiento para construir una unidad espacial de análisis que integrase la información territorial, ecológica y de conservación requerida para la evaluación de los escenarios de cambio de uso del suelo.

En una primera etapa, todas las capas de información fueron incorporadas a un mismo proyecto cartográfico y sometidas a un proceso de estandarización para garantizar su compatibilidad espacial. Esta etapa incluyó la verificación del sistema de referencia de coordenadas, la consistencia geométrica y la extensión espacial de las capas utilizadas. Posteriormente, la información fue recortada considerando únicamente el territorio continental mexicano, excluyendo las zonas marinas debido a que el análisis de esta investigación se centró exclusivamente en los ecosistemas terrestres.

Una vez preparada la información, se procedió a construir la unidad espacial de análisis mediante una secuencia de operaciones de geoprocesamiento. Inicialmente, la división política estatal fue intersectada con la regionalización empleada por GCAM, tal como se puede observar en la Figura 8. Posteriormente, el resultado obtenido se intersectó con la cartografía de ecorregiones terrestres (ver Figura 9), y, finalmente, con la Serie VII de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI. Como resultado de este procedimiento se obtuvo una capa geoespacial en la que cada polígono quedó caracterizado simultáneamente por su entidad federativa, región GCAM, ecorregión

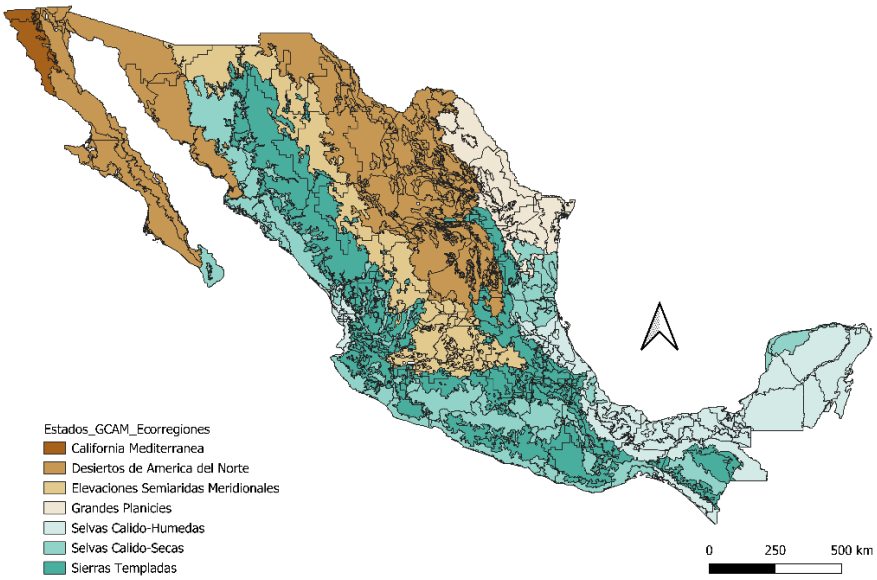
terrestre y categoría de uso del suelo y vegetación (QGIS Development Team, s. f.-b; ver Figura 10).

Figura 8. Distribución de las entidades federativas de México entre las regiones del modelo GCAM.



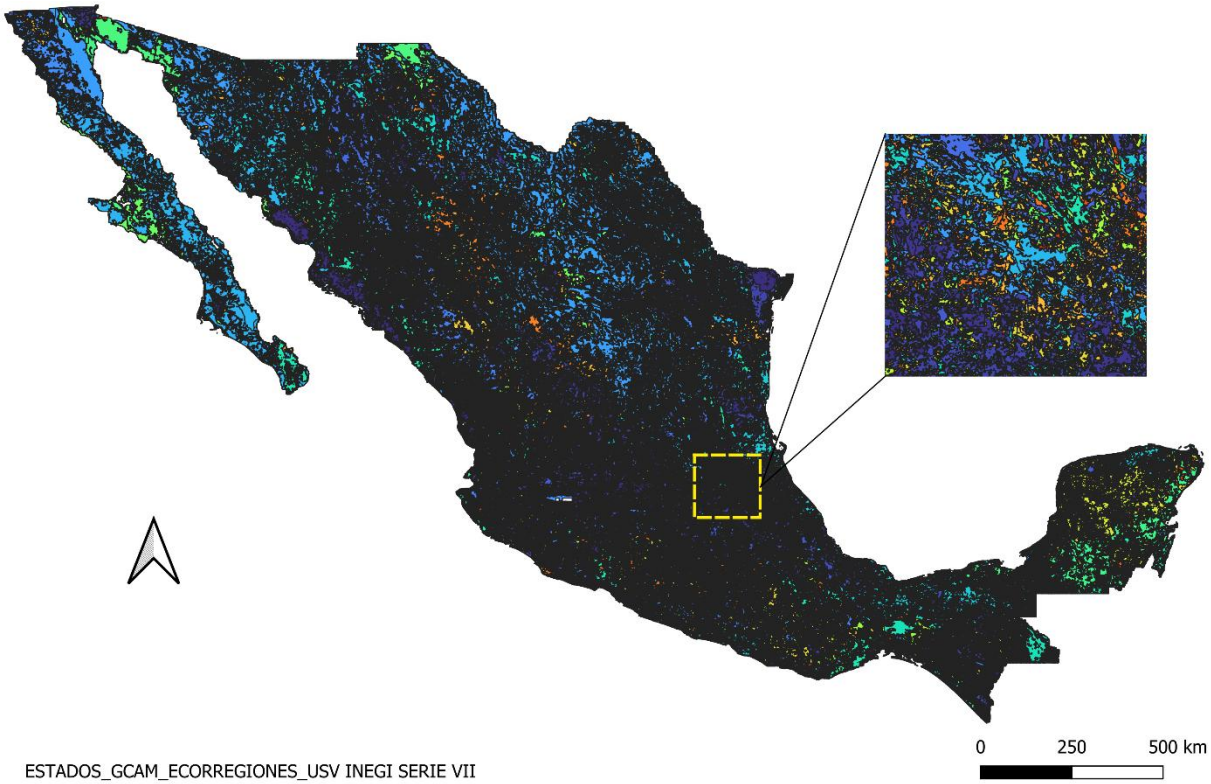
El mapa muestra la distribución espacial de las entidades federativas de México de acuerdo con las regiones definidas en el modelo GCAM, representadas mediante una rampa de tonalidades verdes. Cada tonalidad corresponde a una región del modelo, permitiendo identificar la agrupación de los estados que la integran. Elaboración propia con datos de GCAM (2025) y CONANP (2025a)

Figura 9. Ecorregiones de nivel I de México en las regiones del modelo GCAM.



Las entidades federativas previamente agrupadas de acuerdo con las regiones del modelo GCAM se clasificaron según las ecorregiones de nivel I de México presentes en cada una de ellas, representadas mediante diferentes tonalidades. El mapa muestra la distribución espacial de dichas ecorregiones dentro de las regiones de GCAM utilizadas para el análisis. Elaboración propia con datos de GCAM (2025), CONANP (2025a) e INEGI et al. (2008).

Figura 10. Distribución de los usos de suelo y tipos de vegetación en las regiones del modelo GCAM y ecorregiones de nivel I de México.

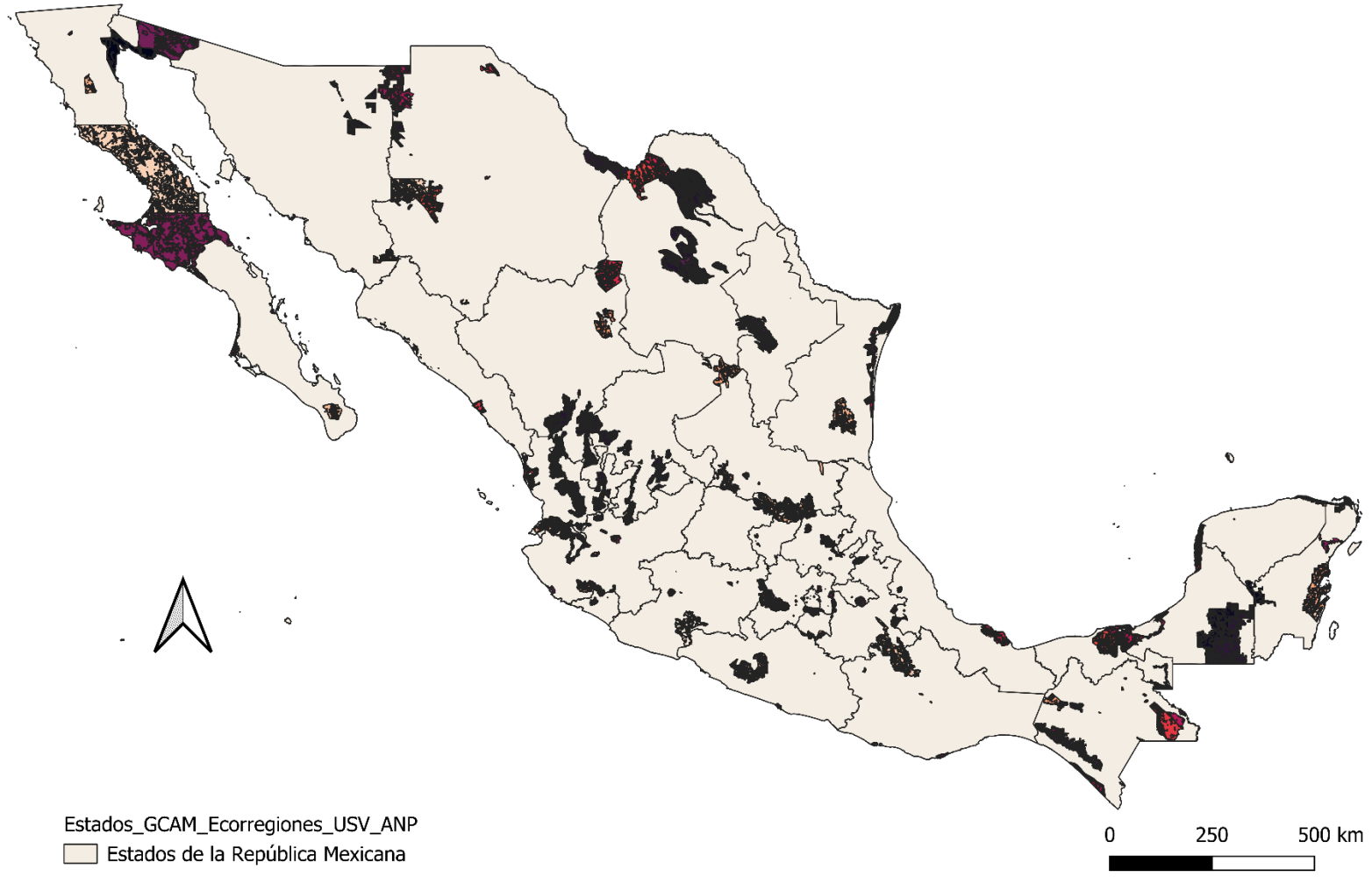


Las entidades federativas fueron agrupadas conforme a la regionalización del modelo GCAM y clasificadas según las ecorregiones de nivel I presentes en ellas; posteriormente, se incorporó la distribución de los diferentes usos de suelo y tipos de vegetación. Cada categoría se representa mediante una tonalidad diferenciada. Asimismo, el mapa incluye un acercamiento a una sección del territorio con el propósito de facilitar la visualización, a una escala mayor, de la distribución de las categorías de Uso del Suelo y Vegetación correspondientes a la Serie VII del INEGI. Este acercamiento responde únicamente a criterios de representación cartográfica y no implica que el área ampliada tenga una mayor relevancia respecto del resto del territorio representado. Elaboración propia con datos de GCAM y CONANP (2025a).

En una segunda etapa, esta unidad espacial fue intersectada de manera independiente con las capas correspondientes a las Áreas Naturales Protegidas (ANP), como se observa en la Figura 11, y las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC), ver Figura 12. Este procedimiento permitió identificar la presencia y distribución de ambas figuras dentro de las unidades espaciales previamente construidas y asociar las categorías de uso del suelo y vegetación con la información de conservación correspondiente.

Finalmente, ambas capas fueron integradas mediante la herramienta *Unir capas vectoriales* de QGIS (QGIS Development Team, s. f.-a; Figura 13), obteniendo una base geoespacial consolidada que reúne la información territorial, ecológica, de uso del suelo y de conservación utilizada en la investigación, y que posteriormente permitió analizar su relación espacial con los escenarios de uso del suelo de GCAM.

Figura 11. Usos de suelo y tipos de vegetación dentro de un Área Natural Protegida (ANP) en el contexto de las regiones del modelo GCAM.



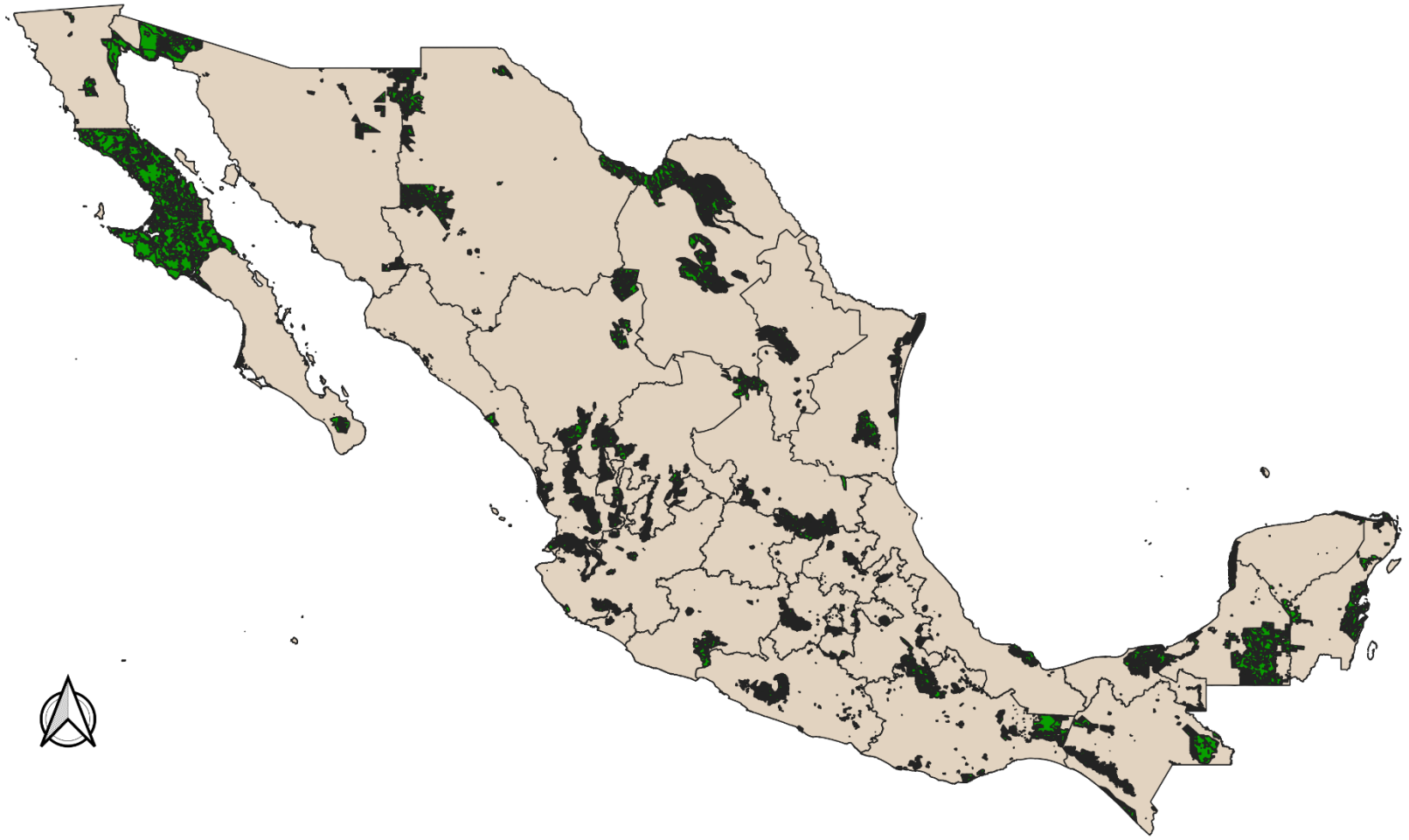
A partir de la clasificación de usos de suelo y tipos de vegetación previamente realizada, se delimitó la información correspondiente a la superficie comprendida dentro del ANP seleccionada. Los límites estatales se muestran como referencia espacial. Elaboración propia con datos de GCAM y CONANP (2025a).

Figura 12. Usos de suelo y tipos de vegetación dentro de un Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC) en el contexto de las regiones del modelo GCAM.



A partir de la clasificación de usos de suelo y tipos de vegetación previamente realizada, se delimitó la información correspondiente a la superficie comprendida dentro del ADVC seleccionada. Los límites estatales se muestran como referencia espacial. Elaboración propia con datos de GCAM y CONANP (2025a).

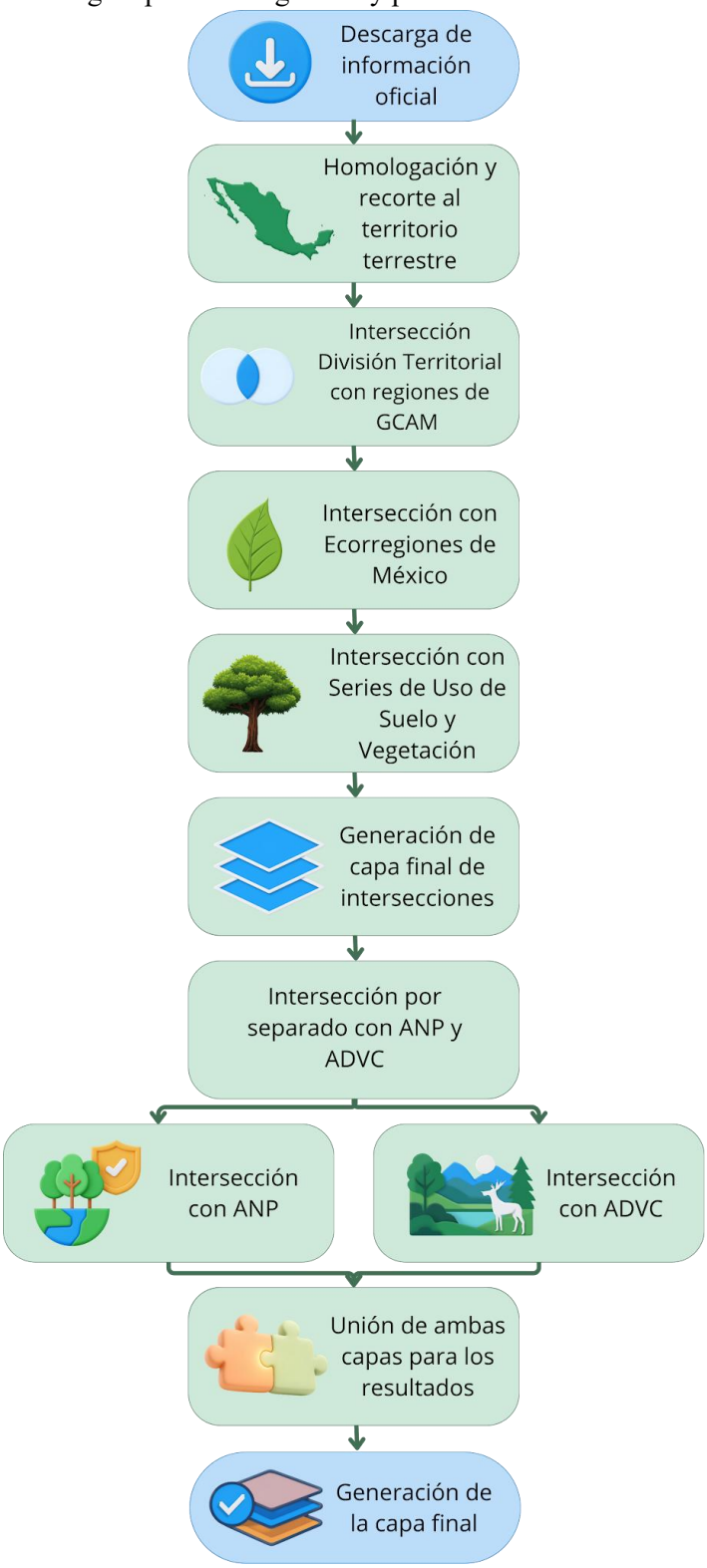
Figura 13. Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) en México.



Se integraron las capas geográficas correspondientes a ANP y ADVC para representar conjuntamente las superficies asociadas a ambos esquemas de conservación. Los límites estatales se incorporan como referencia geográfica. Elaboración propia con datos de GCAM y CONANP (2025a).

La secuencia general del procesamiento geoespacial se presenta en la Figura 14, donde se resumen las principales etapas desarrolladas desde la obtención de la información hasta la construcción de la base espacial utilizada en el análisis.

Figura 14. Flujo metodológico para la integración y procesamiento de la información geoespacial.



Fuente: Elaboración propia, 2026

La base geoespacial obtenida permitió integrar en una sola unidad de análisis información procedente de distintas fuentes oficiales. Sin embargo, debido a que la clasificación de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI presenta un mayor nivel de detalle que las categorías de cobertura terrestre utilizadas por GCAM, fue necesario desarrollar un procedimiento de homologación que hiciera compatibles ambos sistemas de clasificación. Este procedimiento se describe en la siguiente sección.

3.3 Fundamentación de la homologación de categorías de INEGI y GCAM.

La presente investigación tiene como objetivo el análisis de la relación entre las estrategias de mitigación del cambio climático representadas mediante el GCAM desarrollado por el Joint Global Change Research Institute (JGCRI) y el Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), y la distribución espacial de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) en México. Para poder establecer esta relación fue necesario integrar la información proveniente de fuentes nacionales de alta resolución espacial con las categorías de cobertura terrestre utilizadas por GCAM, las cuales se desarrollaron para representar procesos de cambio de uso de suelo a escala global.

Una de las principales limitantes para realizar esta integración radica en que ambos sistemas de clasificación fueron diseñados con objetivos diferentes. Por un lado, las Series de Uso de Suelo y Vegetación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) describen detalladamente la diversidad de coberturas presentes en el territorio nacional, diferenciando no solo tipos de vegetación sino también sistemas agrícolas, comunidades secundarias y otras unidades con características ecológicas específicas. En contraste, GCAM agrupa la superficie terrestre en un número reducido de categorías generales que responden a las necesidades de modelación del uso del suelo y de los cambios asociados a distintos escenarios socioeconómicos y climáticos (JGCRI, s. f.-a). En consecuencia, no existe una correspondencia directa entre ambas clasificaciones, por lo que fue necesario homologar la información para posibilitar su análisis conjunto.

Debido a la diferencia entre ambas, fue necesario desarrollar un procedimiento de homologación que permitiera establecer equivalencias entre las categorías definidas por el INEGI y las categorías de cobertura terrestre empleadas por GCAM. El propósito de este procedimiento no fue simplificar la información nacional, sino generar una base de datos compatible con la estructura del modelo, preservando en la medida de lo posible las características ecológicas y funcionales de las coberturas originales.

Dicha homologación se hizo mediante un análisis de las características estructurales y funcionales de cada categoría de uso del suelo y vegetación. Por ello, se consideraron criterios como la dominancia del estrato vegetal, la composición de la cobertura, el grado de intervención antrópica, la función productiva del suelo y la afinidad ecológica entre las categorías nacionales y las clases generales

representadas por GCAM. Tomando en cuenta estos criterios, a cada categoría del INEGI se le asignó la categoría del modelo que mejor representaba su comportamiento ecológico y funcional.

Como resultado de este proceso metodológico se obtuvo una correspondencia entre las categorías de Uso del Suelo y Vegetación Serie VII y las categorías forest, shrubs, grass and pasture, crops, water y rock and desert, utilizadas por GCAM. Esta homologación constituyó el insumo principal para la construcción de la base espacial empleada en la investigación, permitiendo posteriormente integrar la información territorial con las estrategias de cambio de uso del suelo analizadas mediante el modelo.

3.4 Criterios utilizados para la homologación

Una vez establecido el requisito de hallar una correspondencia entre ambas categorías, se definieron los criterios para guiar el proceso de homologación. Debido a que ambos sistemas de clasificación fueron desarrollados con propósitos distintos, la asignación de las categorías no se realizó mediante una equivalencia nominal, sino mediante un análisis de sus características ecológicas, estructurales y funcionales.

El procedimiento se fundamentó con la evaluación de cada categoría de uso del suelo y vegetación considerando los atributos que determinan el comportamiento general de la cobertura terrestre dentro de los procesos representados por GCAM. Por ello, se analizaron la composición de la vegetación, el estrato dominante, la función ecológica del ecosistema, el grado de modificación por actividades humanas y el uso principal del suelo. Estos criterios permitieron identificar la categoría del modelo que representaba de manera más adecuada el funcionamiento de cada cobertura descrita por el INEGI.

Los criterios considerados durante la homologación fueron los siguientes:

- Dominancia del estrato vegetal. Se identificó el estrato predominante (arbóreo, arbustivo o herbáceo), ya que este determina gran parte de la estructura física de la cobertura y su correspondencia con las categorías generales de GCAM.
- Estructura y composición de la cobertura. Se evaluó la organización de la vegetación, considerando la presencia de comunidades forestales, arbustivas, herbáceas o superficies sin cobertura vegetal significativa.
- Función ecológica del ecosistema. Se consideró el papel que desempeña cada cobertura dentro del paisaje, distinguiendo ecosistemas forestales, agroecosistemas, humedales, cuerpos de agua y ambientes áridos.
- Grado de intervención antrópica. Se diferenciaron coberturas naturales, vegetación secundaria y superficies destinadas a actividades productivas,

reconociendo que el origen de la cobertura puede influir en su representación dentro del modelo.

- Uso predominante del suelo. En las categorías agrícolas se privilegió la función productiva de la superficie, independientemente del régimen hídrico o del sistema de manejo empleado, debido a que GCAM representa estos usos dentro de una única categoría de tierras agrícolas.

Con base en estos criterios, las categorías del INEGI fueron agrupadas en las seis categorías generales utilizadas por GCAM: *forest*, *shrubs*, *grass and pasture*, *crops*, *water* y *rock and desert*. La asignación se realizó buscando conservar la mayor coherencia posible entre las características ecológicas de las coberturas nacionales y la representación simplificada empleada por el modelo.

Es importante señalar que este procedimiento constituye una decisión metodológica desarrollada específicamente para la presente investigación. Si bien la clasificación se apoyó en definiciones oficiales de cobertura terrestre y literatura especializada, la correspondencia entre las categorías del INEGI y las categorías de GCAM responde a la necesidad de construir una base de datos espacial compatible con los requerimientos del modelo, por lo que representa una propuesta de homologación elaborada para los fines de este estudio.

Con el propósito de transparentar este procedimiento, en la siguiente sección se presenta la correspondencia completa entre las categorías de Uso del Suelo y Vegetación Serie VII del INEGI y las categorías de cobertura terrestre utilizadas por GCAM, así como la justificación ecológica de las asignaciones realizadas.

3.5 Correspondencia entre las categorías.

Una vez definidos los criterios metodológicos de homologación, se llevó a cabo la correspondencia entre las categorías, permitiendo la integración de la información geoespacial de escala nacional con un modelo desarrollado para representar la dinámica global del uso del suelo bajo distintos escenarios de desarrollo y mitigación del cambio climático.

La homologación se realizó mediante la revisión individual de cada una de las categorías presentes en la Serie VII, considerando las características ecológicas y funcionales descritas en la sección anterior. Debido a que la clasificación del INEGI presenta un alto nivel de detalle y distingue diferentes tipos de vegetación, sistemas agrícolas, coberturas secundarias y superficies con distintos grados de intervención antrópica, fue necesario analizar cada categoría de manera independiente antes de asignarla a una de las categorías generales empleadas por GCAM.

Durante este proceso se evaluó la correspondencia entre las características de cada cobertura terrestre y la representación conceptual utilizada por el modelo. La asignación no se realizó a partir de la similitud en la denominación de las categorías,

sino mediante la identificación de la categoría de GCAM que representara de manera más adecuada su estructura, composición y funcionamiento ecológico. La única excepción correspondió a las categorías *urban* y *water*, cuya correspondencia entre las clasificaciones de GCAM e INEGI es directa, debido a que representan categorías equivalentes en ambas fuentes, como se muestra en la Tabla 12.

De esta manera, categorías con denominaciones diferentes pudieron agruparse dentro de una misma categoría de GCAM cuando compartían características ecológicas equivalentes, como se muestra en la Tabla 13. Por el contrario, coberturas pertenecientes a un mismo tipo general de vegetación pudieron asignarse a categorías distintas cuando presentaban diferencias relevantes en su estructura o estado sucesional, como se observa en la Tabla 14.

Como resultado de este procedimiento, las categorías de Uso del Suelo y Vegetación Serie VII fueron agrupadas en las seis categorías generales utilizadas por GCAM: *forest, shrubs, grass and pasture, crops, water* y *rock and desert.* Esta reducción de categorías permitió generar una clasificación compatible con la estructura del modelo sin perder la trazabilidad de la información original proveniente del INEGI.

Las Tablas 12, 13 y 14 presentan la correspondencia completa utilizada durante el desarrollo de la investigación. En ellas se muestran las categorías originales de Uso del Suelo y Vegetación Serie VII, la superficie identificada dentro de las áreas de conservación analizadas y la categoría de cobertura terrestre de GCAM a la que fue asignada cada una de ellas. Estas tablas constituyen el producto directo del proceso de homologación y representan el insumo metodológico utilizado para la construcción de la base de datos espacial empleada en los análisis posteriores.

Tabla 12. Homologación directa de las categorías de Uso del Suelo y Vegetación de INEGI con las categorías de GCAM.

USV SERIE VII	ÁREA PROTEGIDA (ha)	USV GCAM	ÁREA PROTEGIDA TOTAL (ha)
ASENTAMIENTOS HUMANOS	43219.9371	urban	43219.9371
CUERPO DE AGUA	170233.1856	water	170233.1856

Fuente: Elaboración propia con datos de GCAM (2025)

Tabla 13. Agrupación de categorías de INEGI en una misma categoría de GCAM según sus características ecológicas.

USV SERIE VII	ÁREA PROTEGIDA (ha)	USV GCAM	ÁREA PROTEGIDA TOTAL (ha)
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL	1,779.12	crops	756,807.25
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y PERMANENTE	19.19		
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y SEMIPERMANENTE	2.74		
AGRICULTURA DE HUMEDAD PERMANENTE	-		
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE	19.48		
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	-		
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	63,529.26		
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE	15,907.85		
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	41,143.83		
AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE	5,737.83		
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE	7,656.16		
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	809.76		
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	527,606.93		
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	29,275.18		
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE	3,464.62		
AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE	42,602.75		

AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE	12,363.62		
AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	4,888.92		
BOSQUE CULTIVADO	1,065.49	Bosque	3,593,066.36
BOSQUE DE AYARÍN	11,595.08		
BOSQUE DE CEDRO	98.64		
BOSQUE DE ENCINO	1,017,430.03		
BOSQUE DE ENCINO-PINO	617,847.44		
BOSQUE DE GALERÍA	3,401.37		
BOSQUE DE MEZQUITE	7,504.29		
BOSQUE DE OYAMEL	48,783.33		
BOSQUE DE PINO	672,631.03		
BOSQUE DE PINO-ENCINO	960,562.44		
BOSQUE DE TÁSCATE	11,627.91		
BOSQUE INDUCIDO	215.56		
BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	240,303.76		
PASTIZAL CULTIVADO	419,599.46	grass and pasture	1,506,987.84

PASTIZAL GIPSÓFILO	276.59		
PASTIZAL HALÓFILO	110,016.42		
PASTIZAL INDUCIDO	406,394.87		
PASTIZAL NATURAL	478,662.96		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL GIPSÓFILO	4.20		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL HALÓFILO	13,092.14		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL	78,941.19		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE AYARÍN	7,169.39	shrubs	2,138,559.89
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE CEDRO	175.63		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	555,732.99		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	160,359.32		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE GALERÍA	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE MEZQUITE	983.28		
VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE OYAMEL	4,217.25		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO	258,206.72		

VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	192,732.44		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE TÁSCATE	17,293.95		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	36,384.12		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE CHAPARRAL	13,603.54		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MANGLAR	25,515.67		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL CRASICAULE	37,660.03		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO	26,754.46		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO	1,200.65		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCOCAULE	17,461.80		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLINA	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBMONTANO	51,086.44		

VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBTROPICAL	23,827.63		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL TROPICAL	327.80		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL XERÓFILO	8,296.18		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PALMAR NATURAL	1,053.07		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA	81,768.62		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA	229.92		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	441,462.34		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	7,507.32		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA	24,249.94		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA	1,176.32		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA	26.22		

VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA DE GALERÍA	58.63		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA	5,057.86		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	57,416.35		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	79,564.01		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE GALERÍA	-		
ACUÍCOLA	4,053.62	water	4,053.62

Tabla 14. Asignación de categorías de INEGI a distintas categorías de GCAM según sus características estructurales y estado sucesional.

USV SERIE VII	ÁREA PROTEGIDA (ha)	USV GCAM	ÁREA PROTEGIDA TOTAL (ha)
MANGLAR	427,728.39	Bosque	5,251,256.9152
MEZQUITAL TROPICAL	11,611.53		
PALMAR INDUCIDO	5,205.50		
PALMAR NATURAL	2,574.62		
SELVA ALTA PERENNIFOLIA	642,581.17		
SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA	63,288.43		
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	905,027.72		
SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	15,006.16		
SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA	351,523.38		
SELVA BAJA PERENNIFOLIA	717.18		
SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA	100.36		
SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA	50,765.78		
SELVA DE GALERÍA	1,603.02		
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA	53,046.18		
SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	243,592.94		
SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	1,103,608.45		
VEGETACIÓN DE PETÉN	37,326.40		

VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE AYARÍN	596.81		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE CEDRO	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	124,416.35		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	75,071.32		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE GALERÍA	130.98		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE MEZQUITE	685.32		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE OYAMEL	7,500.92		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO	126,446.30		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	220,437.12		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE TÁSCATE	18,342.94		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	79,836.90		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE MANGLAR	3,101.99		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE MEZQUITAL TROPICAL	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE PALMAR NATURAL	641.41		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA	145,983.27		

VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA	4,918.00		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	119,683.52		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	8,017.30		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA	43,628.94		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA	1,447.07		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA	634.53		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA DE GALERÍA	272.46		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA	2,937.65		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	161,686.38		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	185,766.97		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE VEGETACIÓN DE PETÉN	3,765.26		
DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	36,327.36	rock and desert	474,290.3296
SIN VEGETACIÓN APARENTE	437,962.97		

MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	1,414,683.87	grass and pasture	5,836,071.9005
MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	1,680,409.75		
POPAL	84,346.37		
SABANA	13,309.80		
SABANOIDE	14,529.70		
TULAR	491,410.73		
VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS	887,277.33		
VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS	75,521.82		
VEGETACIÓN GIPSÓFILA	3,181.19		
VEGETACIÓN HALÓFILA HIDRÓFILA	178,970.13		
VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	872,780.08		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	57,866.52		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	8,727.68		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS	115.07		

VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA HIDRÓFILA	1,724.18		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	50,964.51		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	240.94		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS	12.24		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	-		
CHAPARRAL	286,187.51	shrubs	3,921,775.8795
MATORRAL CRASICAULE	119,001.03		
MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO	81,575.93		
MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO	183,112.35		
MATORRAL SARCOCAULE	1,393,595.99		
MATORRAL SARCO-CRASICAULE	1,284,180.78		
MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLINA	21,665.59		
MATORRAL SUBMONTANO	459,744.15		
MATORRAL SUBTROPICAL	14,675.62		

MEZQUITAL XERÓFILO	214,806,459.60		
VEGETACIÓN DE GALERÍA	36,080.96		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO	5,168.46		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	3,294.81		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE OYAMEL	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO	116.19		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	581..93644		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE TÁSCATE	12.69		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	2,497.40		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MANGLAR	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL CRASICAULE	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DE CONIFERAS	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO	-		

VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLINA	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE PALMAR NATURAL	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE PASTIZAL NATURAL	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA	89.14		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA	376.11		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	2,773.95		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA	327.18		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	-		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	-		
PRADERA DE ALTA MONTAÑA	17,309.13	tundra	17,309.1275

3.6 Justificación ecológica de las asignaciones

Los pastizales naturales son comunidades vegetales en las que predominan los pastos y hay pocos árboles y arbustos (CONABIO, s. f.-b). La homologación de las categorías se sustentó en criterios ecológicos y funcionales que permitieron conservar la representatividad de las coberturas originales dentro de la estructura simplificada del modelo. Las seis categorías de GCAM permitieron agrupar ecosistemas con categorías semejantes en términos de estructura de la vegetación, funcionamiento ecológico y uso predominante del suelo.

Las asignaciones realizadas no obedecen exclusivamente a la denominación de las categorías del INEGI, sino al análisis de los atributos que determinan su comportamiento dentro del paisaje. En consecuencia, la homologación buscó mantener coherencia entre las coberturas nacionales y la representación conceptual utilizada por GCAM para modelar los cambios en el uso del suelo.

A continuación, se presentan las justificaciones correspondientes a cada una de las categorías de cobertura terrestre empleadas por GCAM.

3.6.1 Categoría forest

Las coberturas homologadas con la categoría forestal corresponden a ecosistemas cuya característica principal es el predominio del estrato arbóreo y la presencia de una estructura forestal consolidada. Estos ecosistemas desempeñan funciones ecológicas relacionadas con el almacenamiento del carbono, la regulación hidrológica, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de procesos ecológicos a gran escala, por lo que su representación dentro de GCAM corresponde a la categoría destinada a superficies forestales.

A este grupo se incluyeron los distintos tipos de bosques templados presentes en México, como los bosques de pino, encino, oyamel, táscate y bosque mesófilo de montaña, así como las diferentes variantes de selvas tropicales, manglares palmares naturales e inducidos y la vegetación secundaria arbórea derivada de estos ecosistemas. Aunque estas coberturas presentan diferencias en composición florística, distribución geográfica y estado sucesional, todas conservan una estructura dominada por vegetación arbórea, característica clave que se constituye como el criterio principal para su incorporación dentro de la categoría forest. Las justificaciones específicas para cada tipo de vegetación se presentan en el Anexo C.

3.6.2 Categoría shrubs

Esta categoría aprueba coberturas caracterizadas por el predominio de vegetación arbustiva o de porte bajo, donde el estrato arbóreo se encuentra ausente o representa una proporción poco significativa de la cobertura. Estas comunidades presentan una biomasa menor comparada con los ecosistemas forestales y suelen desarrollarse bajo

condiciones ambientales que limitan el crecimiento de árboles de gran tamaño, como ocurre en diversas zonas áridas y semiáridas del país.

En este grupo se incluyeron los diferentes tipos de matorrales, chaparrales y otras comunidades dominadas por vegetación arbustiva descritas por la serie VII del INEGI. La asignación como se puede ver en la Tabla 14 respondió principalmente a la estructura de la vegetación y no a la localización geográfica o a la composición florística de cada comunidad.

3.6.3 Categoría Grass and pasture

Las coberturas que se asignaron a grass and pasture corresponden a comunidades donde predomina el estrato herbáceo, tanto de origen natural como inducido. Estas superficies incluyen pastizales naturales, cultivados e inducidos y otras comunidades herbáceas cuya estructura y funcionamiento ecológico presentan mayor afinidad con los sistemas representados por esta categoría dentro de GCAM.

De la misma manera, se incorporaron coberturas hidrófilas dominadas por vegetación herbácea, como el pop al, debido a que su composición estructural se encuentra determinada por especies emergentes y graminoides, sin presencia significativa de vegetación arbórea dominante.

3.6.4 Categoría crops

La categoría crops comprende todas aquellas superficies destinadas a la producción agrícola, independientemente del régimen de humedad, tipo de cultivo o intensidad del manejo. Debido a que GCAM representa la agricultura mediante una categoría general de tierras cultivadas, las distintas modalidades agrícolas identificadas por el INEGI fueron integradas dentro de esta clase.

Por esta razón se homologaron las diferentes categorías agrícolas presentes en la Serie VII, incluyendo agricultura de riego, de temporal y otras modalidades productivas, priorizando la función del suelo sobre las características específicas de cada cultivo, tal como se puede observar en la tabla 13.

3.6.5 Categoría rock and desert

Las coberturas homologadas bajo la categoría rock and desert corresponden a superficies donde la vegetación es escasa o inexistente y predominan elementos como roca expuesta, suelo desnudo o comunidades adaptadas a condiciones extremas de aridez. Debido a estas características estructurales, estas coberturas presentan un comportamiento ecológico muy diferente al de los ecosistemas forestales, arbustivos o herbáceos, por lo que se agruparon dentro de una categoría independiente.

En este grupo se englobaron las superficies sin vegetación aparente, áreas desprovistas de vegetación y algunos tipos de matorral xerófilo con predominio de suelo desnudo y baja cobertura vegetal, cuya estructura general resulta consistente con la representación utilizada por GCAM.

3.7 Integración de los escenarios de GCAM al análisis espacial

Una vez realizada la homologación entre las categorías de uso del suelo y vegetación de INEGI y las categorías empleadas por GCAM, se incorporó la información de los escenarios de modelación a la base de datos geoespacial desarrollada en este estudio. Esta integración permitió relacionar las categorías de uso del suelo representadas por el modelo con su distribución espacial en el territorio nacional y con las unidades de análisis consideradas para evaluar su relación con la conservación ambiental.

Para ello, se utilizaron las superficies de uso del suelo proyectadas por GCAM para las categorías correspondientes a cada escenario. Estas categorías fueron vinculadas con las categorías homologadas de la información de INEGI Serie VII, de acuerdo con las correspondencias y criterios ecológicos descritos en las secciones anteriores. De esta manera, la información generada por el modelo pudo analizarse conjuntamente con la distribución espacial de los usos del suelo y vegetación, las regiones de GCAM, las ecorregiones y las áreas consideradas para la conservación.

El análisis no consistió en la construcción de un escenario contrafactual independiente. En su lugar, se trabajó con los escenarios disponibles dentro del conjunto de modelaciones desarrollado para el proceso técnico correspondiente, particularmente con el escenario de referencia y los escenarios de mitigación considerados en el análisis. Por lo tanto, la comparación entre escenarios se realizó a partir de las superficies de uso del suelo representadas por cada uno de ellos, manteniendo como unidad de análisis las categorías de GCAM previamente homologadas.

Para cada categoría de uso del suelo se identificaron las diferencias de superficie entre el escenario de referencia y el escenario de mitigación correspondiente. Estas diferencias se utilizaron como una medida descriptiva de la variación representada por el modelo entre ambas trayectorias. Un valor positivo indica una mayor superficie de la categoría en el escenario de mitigación respecto al escenario de referencia, mientras que un valor negativo indica una menor superficie. Esta comparación se utilizó únicamente para caracterizar las diferencias entre las trayectorias modeladas.

Los resultados de GCAM fueron posteriormente relacionados con la información espacial de usos del suelo y vegetación y con las capas correspondientes a las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC). Esta integración permitió identificar la correspondencia

espacial entre las categorías representadas por los escenarios y las áreas consideradas en el análisis de conservación.

En consecuencia, las diferencias entre escenarios se interpretaron como diferencias entre superficies modeladas y no como cambios territoriales observados. Asimismo, una mayor o menor superficie representada para una categoría de GCAM no se consideró equivalente, por sí misma, a un aumento o disminución de la superficie conservada. La interpretación de estas relaciones se desarrolló posteriormente a partir de los resultados obtenidos y de su relación con las unidades territoriales de conservación.

3.8 Supuestos utilizados en la construcción de los escenarios

Los escenarios de uso del suelo empleados en este trabajo provienen del procesamiento técnico realizado en el marco de los insumos desarrollados para el proceso de actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) 3.0 de México, con participación del Programa de Investigación en Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México (PINCC-UNAM). En este proceso se generaron escenarios de mitigación (cero emisiones 2050, 2055 y 2060) y un escenario de referencia mediante GCAM, a partir de un conjunto de supuestos definidos para representar distintas trayectorias de uso del suelo y mitigación de emisiones.

La construcción de estos escenarios implicó la definición de supuestos de modelación por parte del investigador responsable de su formulación, el M.C. Rodrigo Muñoz Sánchez del PINCC. Dichos supuestos determinaron las condiciones bajo las cuales se proyectaron las superficies de uso del suelo y, por tanto, forman parte de los insumos que posteriormente fueron utilizados en el presente análisis. En consecuencia, los resultados de GCAM deben interpretarse como trayectorias condicionadas por las decisiones y supuestos adoptados durante la construcción de los escenarios, y no como predicciones deterministas del comportamiento futuro del territorio.

En primer lugar, los usos del suelo históricos representados en GCAM para México fueron recalibrados utilizando información de las series de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI, con el propósito de mejorar la correspondencia entre la representación del modelo y las condiciones observadas en el territorio nacional (INEGI, 2021).

Para los escenarios de cero emisiones netas, se consideró como supuesto la ausencia de deforestación neta en México a partir de 2030. En contraste, el escenario de referencia no incorporó una medida específica de control de la deforestación y mantuvo una tasa de deforestación aproximada de 0.2 % anual respecto de la superficie forestal total, la cual fue originalmente calculada con el área protegida por instrumentos de conservación.

Asimismo, se incorporaron supuestos relacionados con la demanda de alimentos. Para México se consideró una reducción en el consumo de proteína de origen animal a partir de 2040. La construcción del escenario contempló una reducción de la preferencia asociada con este tipo de alimentos de 0.25 % por cada 1 % de incremento del PIB en 2040 y un incremento de 0.75 % en la preferencia correspondiente para 2050.

Adicionalmente, se consideró una reducción del desperdicio de alimentos durante el periodo 2025–2035. Para ello, se utilizaron valores diferenciados de acuerdo con los tipos de alimentos y las regiones consideradas en la construcción de los escenarios, con base en información reportada por el World Resources Institute (WRI) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) (WRI, 2013).

Estos supuestos constituyeron condiciones de entrada para la construcción de los escenarios y, en conjunto con las relaciones internas del modelo, determinaron las trayectorias de uso del suelo posteriormente utilizadas en este trabajo. Por ello, las diferencias observadas entre el escenario de referencia y los escenarios de mitigación se interpretan como resultados condicionados por los supuestos de modelación adoptados.

3.9 Procesamiento de las transiciones de uso del suelo utilizadas en los escenarios

Como parte del proceso técnico de construcción de los escenarios de uso del suelo utilizados en este estudio, se empleó información histórica de las Series VI y VII de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI para caracterizar las transiciones entre categorías de cobertura y uso del suelo. El análisis conjunto de ambas series permitió identificar los cambios registrados entre los dos periodos de referencia y establecer una base histórica para la representación de las transiciones de uso del suelo consideradas posteriormente en el modelado.

Para ello, la información de las Series VI y VII fue organizada de acuerdo con las categorías de uso del suelo y vegetación previamente homologadas con las categorías empleadas por GCAM. Este procedimiento permitió comparar las superficies correspondientes a cada categoría entre ambas series e identificar los cambios de una categoría de origen hacia una categoría de destino. Las transiciones identificadas fueron posteriormente relacionadas con las ecorregiones terrestres, con el propósito de incorporar el contexto ecológico en el que se presentó cada cambio.

A partir de esta organización se obtuvo una base de información que relaciona las transiciones históricas de uso del suelo con su categoría de origen, categoría de destino, ecorregión y región de GCAM correspondiente. Esta integración permitió conservar la relación espacial entre los cambios históricos de cobertura y la regionalización empleada en los escenarios. La información detallada de las transiciones identificadas, así como su correspondencia con las ecorregiones y las

regiones de GCAM, se presenta en el Anexo A.1., donde se incluyen las tablas completas utilizadas durante este procesamiento.

Las transiciones identificadas a partir de las Series VI y VII constituyeron insumos para el procesamiento técnico posterior de los escenarios. En particular, esta información fue utilizada para establecer matrices de transición mediante un enfoque basado en cadenas de Markov, siguiendo el procedimiento descrito por Muller y Middleton (1994). Estas matrices permitieron representar las probabilidades de transición entre las diferentes categorías de uso del suelo a partir del comportamiento observado entre los periodos históricos considerados.

Es importante señalar que la generación de las cadenas y matrices de Markov correspondió a un cálculo independiente realizado en esta investigación por parte del PINCC. El procesamiento de las Series VI y VII efectuado como parte de este trabajo generó y organizó la información histórica que posteriormente fue utilizada en dicho procedimiento técnico para la construcción de los escenarios. Por esta razón, en esta tesis se documenta el procesamiento de los datos históricos y su función como insumo del modelado, sin atribuir a este trabajo la generación de las matrices de transición.

De manera complementaria, las transiciones de uso del suelo fueron asociadas con información relacionada con los reservorios de carbono. Para algunas combinaciones de conversión y ecorregión se contó con valores de biomasa aérea (BA) y biomasa subterránea (BS), según la disponibilidad de los datos proporcionados por el PINCC-UNAM como insumo técnico para la construcción de los escenarios. Estos valores se conservaron como parte de los insumos técnicos asociados con las conversiones de uso del suelo, sin realizar en esta tesis un cálculo independiente de cambios en los reservorios de carbono.

La información de estos valores se organizó de acuerdo con el tipo de conversión y las ecorregiones de nivel I y II correspondientes. De esta manera, una transición entre dos categorías de uso del suelo no se consideró únicamente como un cambio de clasificación, sino que pudo asociarse con las condiciones ecológicas correspondientes al área donde se presentó. Los códigos de conversión y su correspondencia con las subcategorías de uso del suelo se presentan en la Tabla B.1. Los valores de carbono por reservorio y ecorregión se muestran en la Tabla B.2, mientras que la serie anual de 2000 a 2019 se incluye en la Tabla B.3. Estos insumos fueron proporcionados por el PINCC-UNAM para esta investigación; su procedencia primaria no pudo verificarse.

Asimismo, la información histórica fue vinculada con las regiones de GCAM para obtener los insumos necesarios para la representación regional de las transiciones. Esta integración permitió relacionar los cambios identificados a escala de las unidades de información de INEGI con la regionalización utilizada por el modelo. El resultado de este proceso fue una base organizada que permitió conectar la información

histórica de uso del suelo con las categorías de GCAM y con las características ecológicas de las regiones analizadas.

El análisis desarrollado en esta tesis utiliza las superficies y trayectorias de uso del suelo resultantes de los escenarios como insumo para evaluar su relación espacial con elementos relevantes para la conservación ambiental.

En consecuencia, los productos derivados de este procesamiento se incorporaron posteriormente al análisis espacial desarrollado en las secciones subsecuentes. Las superficies de uso del suelo proyectadas por GCAM fueron relacionadas con la información de cobertura y uso del suelo, ecorregiones, Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC), con el propósito de analizar las posibles correspondencias, sinergias y tensiones entre las trayectorias de uso del suelo de los escenarios y los objetivos de conservación considerados en esta investigación.

En conjunto, la metodología descrita permitió integrar las diferentes fuentes de información y generar una base espacial común para el análisis de los escenarios de uso del suelo. A partir de esta base se presentan, en el capítulo siguiente, los resultados obtenidos y su relación con los elementos territoriales considerados para evaluar la consistencia de las trayectorias de uso del suelo con los objetivos de conservación ambiental.

3.10 Procedimiento para el análisis de las trayectorias de uso del suelo

Una vez integradas las categorías de uso del suelo de GCAM con la información espacial procesada, se estableció un procedimiento para analizar las trayectorias de superficie correspondientes a los escenarios de mitigación considerados en esta investigación. El análisis se centró en las categorías de uso del suelo representadas en GCAM y en su evolución durante el horizonte temporal disponible, con especial atención al comportamiento observado hacia el año 2050.

En una primera etapa, se analizaron las superficies proyectadas para cada categoría de uso del suelo a lo largo de las trayectorias del escenario de referencia y de los tres escenarios de cero emisiones netas, con metas en 2050, 2055 y 2060. Para cada categoría se examinó la trayectoria de su superficie con el propósito de identificar incrementos, disminuciones, periodos de cambios más pronunciados y posteriores tendencias de estabilización o modificación gradual. Este procedimiento permitió caracterizar la evolución temporal de las categorías sin asumir que una variación en la superficie de una categoría representa por sí misma una transición directa hacia otra categoría.

Posteriormente, se realizó una comparación de los tres escenarios de cero emisiones netas con el escenario de referencia, utilizando el año 2050 como horizonte temporal común. Para cada categoría de uso del suelo y vegetación se calculó la diferencia

entre la superficie correspondiente a cada escenario de mitigación y la superficie proyectada en el escenario de referencia para el mismo año, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Diferencia\ de\ superficie = Superficie\ del\ escenario\ de\ mitigación - Superficie\ del\ escenario\ de\ referencia$$

Las diferencias se expresaron en miles de km². Un valor positivo indica que la superficie asignada a una determinada categoría es mayor en el escenario de mitigación que en el escenario de referencia, mientras que un valor negativo indica una superficie menor. Esta diferencia se interpretó como una modificación de la superficie modelada para cada categoría y no como una ganancia o pérdida directa de superficie de conservación.

El análisis se realizó considerando las categorías de uso del suelo resultantes de la homologación entre INEGI y GCAM. De esta manera, las diferencias obtenidas pudieron relacionarse posteriormente con las características de cobertura y vegetación representadas espacialmente en la base de datos desarrollada para esta investigación.

El año 2050 se estableció como horizonte común para la comparación principal de los tres escenarios de mitigación con el escenario de referencia. Esta comparación permite examinar sus diferencias de superficie en una misma fecha, sin confundirlas con las que surgen al evaluar años distintos. De manera complementaria, se presentan las trayectorias temporales y la comparación de cada escenario con el de referencia en su respectivo año meta —2050, 2055 y 2060—. Los resultados correspondientes a esos años meta se interpretan por separado, pues no constituyen una comparación directa entre escenarios bajo el mismo horizonte temporal.

Finalmente, las diferencias de superficie obtenidas para las categorías de GCAM se contrastaron con la información espacial de cobertura y uso del suelo, ecorregiones, ANP y ADVC (Ver Anexo A). Este contraste permitió examinar posibles relaciones con los territorios sujetos a conservación, sin asignar directamente las variaciones de superficie proyectadas por GCAM a polígonos específicos.

Los productos derivados de este procedimiento comprenden las trayectorias temporales de superficie por categoría de uso del suelo, las diferencias respecto al escenario de referencia en 2050 y en los respectivos años meta de los escenarios de mitigación, y las representaciones espaciales utilizadas para analizar su relación con los elementos de conservación.

Para efectos de esta investigación, el grado de consistencia se evaluó cualitativamente a partir de las relaciones identificadas entre las modificaciones proyectadas de las categorías de uso del suelo y vegetación y los objetivos de conservación considerados. La evaluación tomó en cuenta la dirección y magnitud de las diferencias respecto al escenario de referencia, su variación entre escenarios y

horizontes temporales, y su relación territorial con las superficies asociadas con los mecanismos de conservación analizados. A partir de estos elementos se identificaron condiciones de compatibilidad potencial y posibles tensiones entre mitigación y conservación. Esta valoración no constituye un índice numérico ni implica una relación causal entre las estrategias de mitigación y los cambios observados en las superficies de conservación.

Capítulo 4: Resultados

4.1 Criterio para la evaluación comparativa de los escenarios

Los resultados obtenidos mediante el modelo GCAM comprenden cuatro escenarios: un escenario de referencia y tres escenarios de mitigación asociados con el cumplimiento de cero emisiones netas en los años 2050, 2055 y 2060. Debido a que estos últimos presentan horizontes temporales distintos, su análisis requiere considerar tanto las condiciones proyectadas en sus respectivos años meta como la evolución de las categorías de uso del suelo y vegetación (USV) a lo largo del periodo de estudio.

Con este propósito, el análisis de los resultados se estructuró en tres niveles. El primero corresponde a la comparación de cada escenario de cero emisiones netas con el escenario de referencia en el año correspondiente a su propia meta. De esta manera, el escenario de cero emisiones netas al 2050 se compara con la referencia en 2050; el escenario de cero emisiones netas al 2055, con la referencia en 2055; y el escenario de cero emisiones netas al 2060, con la referencia en 2060. Esta comparación permite identificar la dirección y magnitud de las diferencias en la superficie proyectada para las distintas categorías de USV cuando cada escenario alcanza su respectivo horizonte temporal.

En este primer nivel de análisis, el escenario de referencia funciona como base de comparación para cada año. Por lo tanto, las diferencias obtenidas corresponden a la superficie proyectada bajo cada escenario de mitigación menos la superficie proyectada por el escenario de referencia en el mismo momento temporal. Este procedimiento permite evitar la comparación de superficies correspondientes a años distintos dentro de cada par escenario–referencia. Los resultados de esta evaluación se presentan en el apartado 4.2 y permiten caracterizar las diferencias asociadas con cada escenario en su respectivo año meta.

No obstante, la comparación de los resultados obtenidos en 2050, 2055 y 2060 debe interpretarse considerando que corresponden a momentos temporales diferentes. En consecuencia, aunque este análisis permite describir las condiciones proyectadas para cada escenario al alcanzar su año meta, las diferencias de magnitud observadas entre los tres escenarios no pueden atribuirse exclusivamente al establecimiento de un horizonte de cero emisiones netas distinto, ya que también interviene la evolución temporal de las superficies proyectadas entre 2050 y 2060.

Por esta razón, como segundo nivel de análisis se examinan las trayectorias completas de las categorías de USV bajo los cuatro escenarios. La representación conjunta del escenario de referencia y de los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060 permite observar cómo evolucionan las superficies a lo largo del periodo analizado, identificar los momentos en los que las trayectorias comienzan a diferenciarse y determinar si las diferencias se mantienen, aumentan o disminuyen

conforme avanza el horizonte temporal. Este análisis se desarrolla en el apartado 4.3 mediante las trayectorias correspondientes a las distintas categorías de USV.

El análisis de las trayectorias también permite distinguir categorías en las que los escenarios permanecen relativamente próximos entre sí de aquellas en las que se presenta una separación más evidente entre la referencia y las trayectorias de mitigación. Sin embargo, debido a que los escenarios de cero emisiones netas presentan años meta diferentes, la observación de las trayectorias completas no sustituye la necesidad de establecer un punto temporal común para realizar una comparación directa entre los cuatro escenarios.

Por ello, el tercer nivel de análisis utiliza 2050 como año común de evaluación. Este año constituye el último punto temporal en el que se dispone simultáneamente de información para las cuatro trayectorias consideradas, debido a que el escenario de cero emisiones netas al 2050 alcanza en ese momento su horizonte meta, mientras que los escenarios con metas en 2055 y 2060 continúan posteriormente sus respectivas trayectorias. La selección de 2050 permite, por tanto, comparar las superficies proyectadas por los cuatro escenarios bajo una misma condición temporal.

En esta comparación, los valores correspondientes a los escenarios de cero emisiones netas al 2055 y 2060 en el año 2050 no representan el cumplimiento de sus respectivas metas. En ambos casos, 2050 constituye únicamente un punto intermedio dentro de sus trayectorias de mitigación. Esta distinción es importante, ya que permite utilizar dichos valores para una comparación transversal entre escenarios sin interpretarlos como las condiciones finales proyectadas para esos horizontes, ya que tanto el de 2055 como el de 2060 continúan avanzando.

A partir de este criterio, en el apartado 4.4 se cuantifican las diferencias entre cada escenario de cero emisiones netas y el escenario de referencia utilizando exclusivamente las superficies proyectadas en 2050. De esta manera, las tres comparaciones emplean simultáneamente el mismo año y la misma trayectoria de referencia, lo que permite identificar cuáles categorías presentan diferencias respecto al escenario de referencia y en cuáles existe una mayor diferenciación entre los propios escenarios de mitigación.

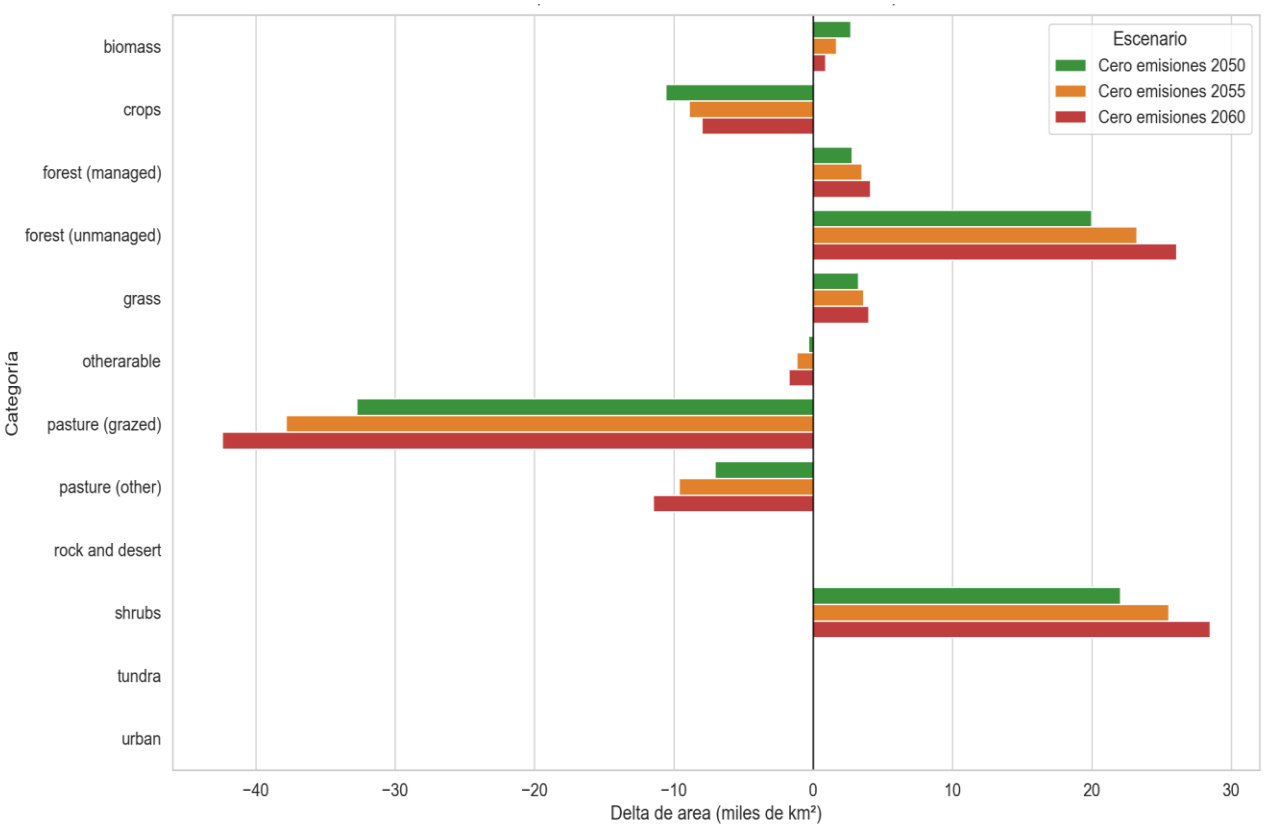
En conjunto, los tres niveles de análisis cumplen funciones complementarias. La comparación en los respectivos años meta permite caracterizar las diferencias entre cada escenario de mitigación y su referencia al alcanzar su horizonte temporal; el análisis de las trayectorias permite examinar la evolución de las superficies y la separación progresiva entre escenarios; y la comparación en 2050 permite evaluar los cuatro escenarios bajo un mismo punto temporal. Esta última comparación constituye además la base temporal común para el análisis espacial posterior, en el que las modificaciones proyectadas en las categorías de USV se relacionan con la información correspondiente a las áreas consideradas para el análisis de conservación.

4.2 Diferencias de uso del suelo y vegetación respecto al escenario de referencia en los años meta

Con el propósito de identificar las modificaciones en la superficie asignada a las diferentes categorías de uso de suelo y vegetación (USV) asociadas con cada trayectoria de mitigación, se calcularon las diferencias entre cada escenario de cero emisiones netas y el escenario de referencia correspondiente a su mismo año meta. De esta manera, el escenario de cero emisiones netas al 2050 se comparó con la referencia en 2050; el escenario de cero emisiones netas al 2055, con la referencia en 2055; y el escenario de cero emisiones netas al 2060, con la referencia en 2060.

La diferencia para cada categoría se obtuvo mediante la resta de la superficie proyectada bajo el escenario de cero emisiones netas menos la superficie correspondiente al escenario de referencia en el mismo año. Los resultados se expresan en miles de km². Por lo tanto, un valor positivo indica que la categoría presenta una superficie mayor bajo el escenario de cero emisiones netas respecto a la referencia, mientras que un valor negativo indica una superficie menor. Estas diferencias representan cambios netos en la superficie asignada a cada categoría por el modelo y no deben interpretarse directamente como una transición específica de una categoría hacia otra.

Figura 15. Diferencias por categoría de escenarios de cero emisiones netas vs referencia



Fuente: Bastien Olvera (2026), con datos de GCAM y PINCC.

La Figura 15 presenta las diferencias correspondientes a los tres escenarios de cero emisiones netas en sus respectivos años meta. Esta representación permite observar tanto la dirección de los cambios —incremento o disminución respecto a la referencia— como su magnitud, y comparar si las categorías que presentan las mayores modificaciones son las mismas bajo los distintos horizontes temporales de mitigación.

4.2.1 Escenario de cero emisiones netas al 2050

En el escenario de cero emisiones netas al 2050, las mayores diferencias positivas respecto al escenario de referencia se concentran en las categorías forest (unmanaged) y shrubs. La primera presenta un incremento de aproximadamente 20.0 mil km², mientras que shrubs presenta un incremento cercano a 22.0 mil km². Estos son los cambios positivos de mayor magnitud observados para este escenario. También se identifican incrementos en forest (managed) y grass, con aproximadamente 2.8 y 3.2 mil km², respectivamente. Aunque estos cambios son considerablemente menores en términos absolutos, muestran que la distribución proyectada bajo el escenario de cero emisiones netas contempla una mayor superficie de estas categorías respecto a la trayectoria de referencia.

La categoría biomass también presenta una diferencia positiva, de aproximadamente 2.7 mil km². En este caso, la magnitud absoluta del cambio debe interpretarse considerando que se trata de una categoría cuya superficie es considerablemente menor que la de forest (unmanaged), shrubs o pasture. Por ello, aunque su diferencia absoluta es menor, representa una modificación importante respecto a la superficie que presenta en el escenario de referencia.

En contraste, las principales diferencias negativas corresponden a categorías asociadas con usos agropecuarios. Pasture (grazed) presenta la mayor reducción, con aproximadamente −32.8 mil km² respecto a la referencia. Le siguen crops, con aproximadamente −10.6 mil km², y pasture (other), con alrededor de −7.1 mil km². La categoría otherarable presenta una diferencia negativa de menor magnitud, cercana a −0.3 mil km².

Las categorías rock and desert, tundra y urban no presentan diferencias respecto al escenario de referencia en este año. En conjunto, el escenario de cero emisiones netas al 2050 muestra, por tanto, un patrón caracterizado por mayores superficies proyectadas en determinadas categorías de vegetación, particularmente forest (unmanaged) y shrubs, acompañadas por menores superficies en categorías agropecuarias, principalmente pasture (grazed) y crops.

4.2.2 Escenario de cero emisiones netas al 2055

Para el escenario de cero emisiones netas al 2055, la comparación se realiza utilizando como referencia el escenario correspondiente al mismo año. El patrón general mantiene similitudes con el observado para el escenario con año meta 2050.

Las categorías forest (unmanaged) y shrubs continúan presentando diferencias positivas de mayor magnitud, mientras que forest (managed) y grass también presentan superficies superiores a las de la referencia.

La categoría biomass mantiene una diferencia positiva, aunque su magnitud es menor que la observada en el escenario cuyo año meta es 2050. En las categorías de uso agropecuario predominan nuevamente las diferencias negativas. Pasture (grazed) presenta la mayor reducción, seguida por crops y pasture (other), mientras que otherarable muestra una modificación negativa de menor magnitud.

La comparación con el escenario de cero emisiones netas al 2050 permite observar que el cambio en el año meta no modifica completamente la dirección de las diferencias. Es decir, las mismas categorías generales continúan mostrando incrementos o reducciones respecto a la referencia. Sin embargo, las magnitudes no son idénticas, lo que indica que el horizonte temporal establecido para alcanzar cero emisiones netas modifica la distribución proyectada de la superficie entre determinadas categorías de USV.

Por su parte, urban, rock and desert y tundra permanecen sin diferencias apreciables respecto a la referencia. Esto indica que, dentro de las simulaciones consideradas, estas categorías presentan una respuesta limitada frente al cambio en el horizonte temporal de mitigación.

4.2.3 Escenario de cero emisiones netas al 2060

En el escenario de cero emisiones netas al 2060, la comparación se realiza entre la trayectoria correspondiente a este escenario y la referencia en 2060. Al igual que en los escenarios anteriores, las diferencias positivas de mayor magnitud se concentran en forest (unmanaged) y shrubs. También se mantienen diferencias positivas en forest (managed) y grass, aunque con magnitudes menores.

Por otro lado, pasture (grazed) constituye nuevamente una de las categorías con mayor diferencia negativa respecto a la referencia. También se observan reducciones en crops y pasture (other), mientras que otherarable presenta una modificación de menor magnitud. De esta manera, el patrón general de redistribución de la superficie observado en los escenarios anteriores se mantiene también cuando el cumplimiento de cero emisiones netas se establece para 2060.

La comparación entre los tres escenarios muestra, sin embargo, que las magnitudes de las diferencias no permanecen constantes al modificar el año meta. Algunas categorías presentan variaciones pequeñas entre escenarios, mientras que otras muestran cambios más perceptibles. Esto indica que el horizonte temporal para alcanzar cero emisiones netas influye en la distribución proyectada de las categorías de USV en el momento correspondiente al año meta.

Al igual que en los escenarios 2050 y 2055, las categorías urban, rock and desert y tundra presentan diferencias nulas o cercanas a cero. En consecuencia, las

principales modificaciones asociadas con los distintos horizontes de mitigación se concentran en un conjunto más reducido de categorías, particularmente aquellas relacionadas con superficies forestales, matorrales, pastizales y cultivos.

4.2.4 Comparación de los cambios entre los tres años meta

Considerando conjuntamente los tres escenarios en sus respectivos años meta, se observa que existe un patrón general consistente en la dirección de las diferencias respecto a la referencia. Forest (unmanaged) y shrubs presentan incrementos de superficie en los tres escenarios, mientras que pasture (grazed), crops y pasture (other) presentan reducciones. Por su parte, forest (managed) y grass presentan diferencias positivas, aunque de menor magnitud.

Esta consistencia en la dirección del cambio no implica que las magnitudes sean iguales entre los tres escenarios. Las diferencias varían de acuerdo con el año meta considerado, lo que permite observar que el horizonte temporal para alcanzar cero emisiones netas modifica la configuración de las categorías de USV en cada punto de evaluación. En algunas categorías, las diferencias entre escenarios son relativamente pequeñas, mientras que en otras resultan más perceptibles.

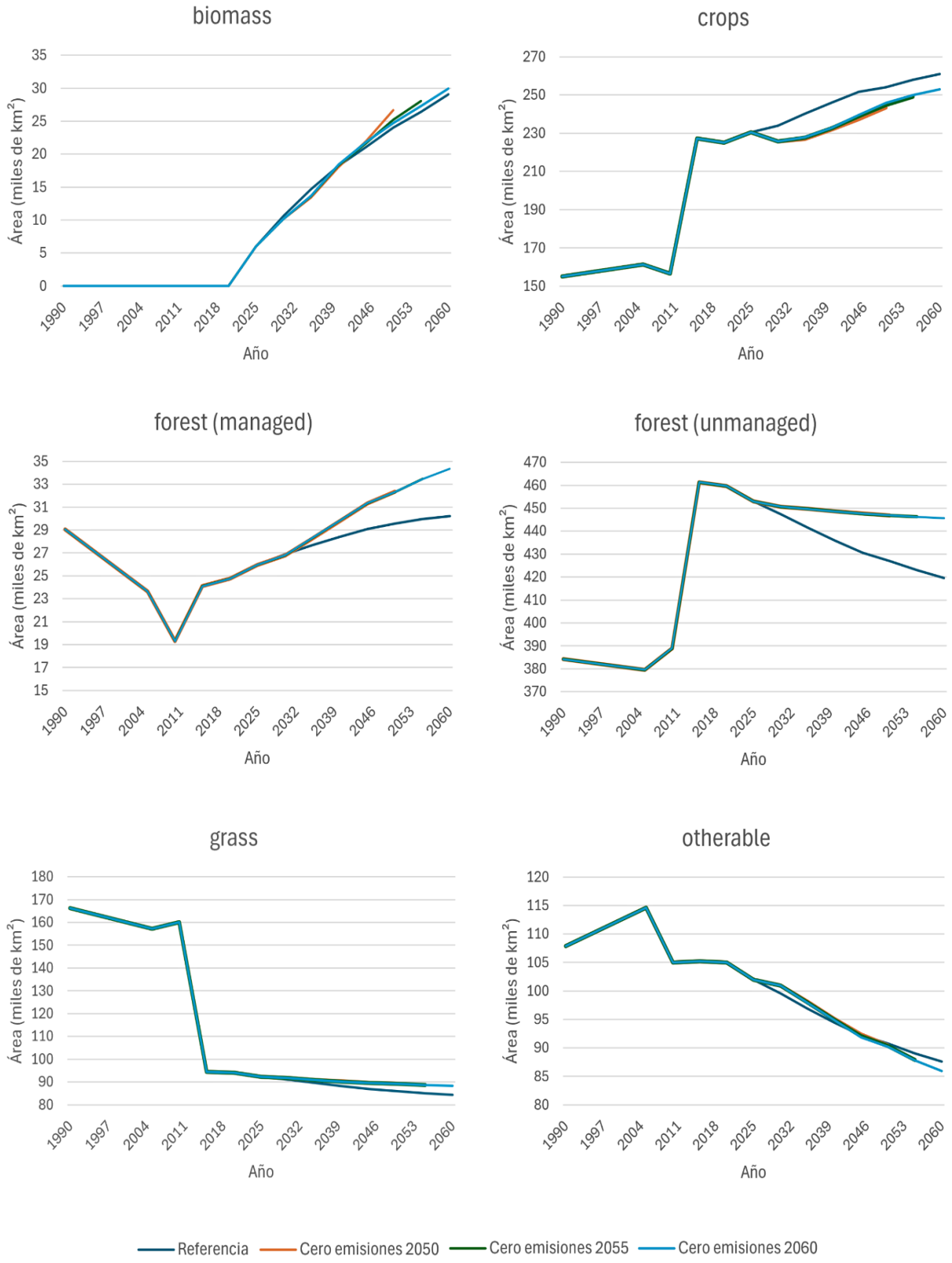
Las categorías con cambios de menor magnitud, como otherarable, urban, rock and desert y tundra, presentan una menor diferenciación entre los escenarios. En contraste, las mayores diferencias absolutas se concentran en categorías con superficies más extensas, como forest (unmanaged), shrubs y pasture (grazed). No obstante, la magnitud absoluta de una diferencia debe interpretarse en relación con la superficie total de la categoría, ya que un mismo cambio expresado en miles de km² puede representar proporciones diferentes.

En conjunto, los resultados de la Figura 15 muestran que los tres escenarios de cero emisiones netas presentan diferencias respecto a sus correspondientes escenarios de referencia. Si bien existe un patrón general compartido entre los tres horizontes de mitigación en cuanto a la dirección de las diferencias, su magnitud varía entre categorías y años meta.

Este análisis permite caracterizar las diferencias asociadas con cada escenario en el momento correspondiente a su año meta. A continuación, se examinan las trayectorias completas de las categorías de USV con el propósito de identificar su evolución temporal y la forma en que se produce la separación entre los escenarios. Posteriormente, en el apartado 4.4, los cuatro escenarios se comparan utilizando 2050 como punto temporal común.

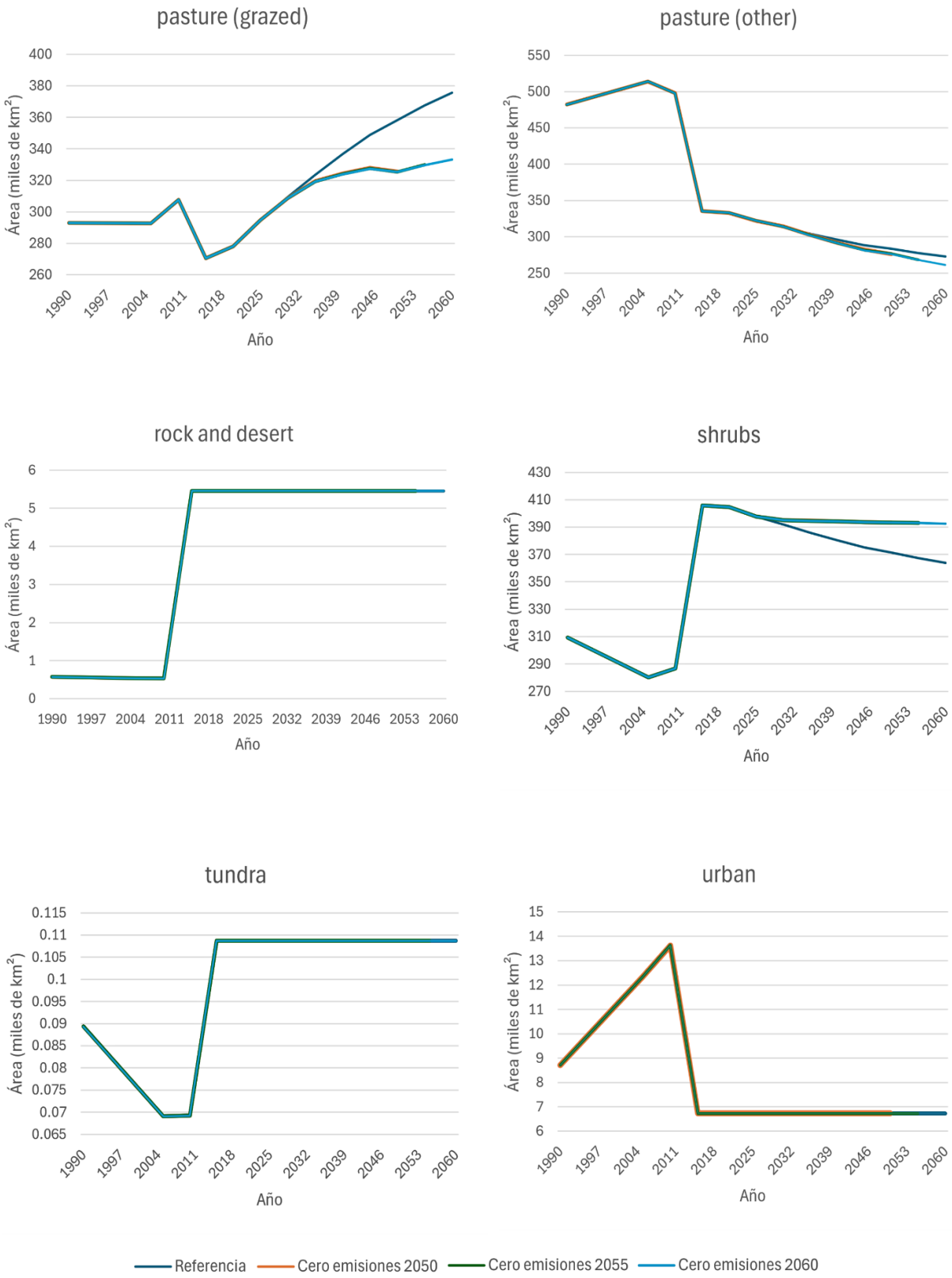
4.3 Trayectorias de las categorías de uso del suelo y vegetación bajo los escenarios analizados

Figura 16. Trayectoria de las categorías de uso del suelo hasta el año meta de cada escenario VS referencia. a) Primer grupo de categorías.



Fuente: Elaboración propia con datos de GCAM (2025) y PINCC (2025)

Figura 17. Trayectoria de las categorías de uso del suelo hasta el año meta de cada escenario VS referencia. b) Segundo grupo de categorías.



Fuente: Elaboración propia con datos de GCAM (2025) y PINCC (2025)

El análisis presentado en el apartado anterior permitió identificar las diferencias entre cada escenario de cero emisiones netas y su respectivo escenario de referencia en los años meta de 2050, 2055 y 2060. No obstante, la comparación de los valores correspondientes únicamente a los años meta no permite observar la forma en que las superficies proyectadas evolucionan a lo largo del horizonte temporal analizado. Por esta razón, en este apartado se examinan las trayectorias completas de las diferentes categorías de uso del suelo y vegetación bajo los cuatro escenarios considerados.

Las Figuras 16 y 17 muestran la evolución de las superficies proyectadas para las distintas categorías de USV. Conforme avanza el periodo de proyección, a partir del año 2025 que es cuando entró en vigor la NDC 3.0, comienzan a observarse diferencias entre la trayectoria de referencia y los escenarios de cero emisiones netas, aunque tanto el momento como la magnitud de esta separación varían según la categoría considerada.

4.3.1 *Biomass*

La categoría *biomass* presenta una trayectoria diferenciada respecto a las categorías con superficies más extensas. Durante buena parte de la primera etapa de la serie, las cuatro trayectorias permanecen próximas a cero, sin diferencias apreciables entre escenarios. Hacia los últimos años del periodo histórico y de proyección comienza a observarse un incremento de la superficie, particularmente a partir de aproximadamente 2020, como se observa en las trayectorias correspondientes de las Figuras 16 y 17.

En 2050, la trayectoria de referencia presenta aproximadamente 24.0 mil km², mientras que los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060 alcanzan aproximadamente 26.7, 25.2 y 24.7 mil km², respectivamente. Por lo tanto, las tres trayectorias de mitigación presentan una superficie superior a la referencia en este año, aunque existe una diferenciación entre ellas.

El escenario con año meta 2050 presenta la mayor superficie de *biomass* en 2050, seguido por los escenarios 2055 y 2060. Esta diferencia entre las trayectorias se mantiene posteriormente, aunque las superficies presentan variaciones relativamente pequeñas. El comportamiento observado indica que el año meta establecido para alcanzar cero emisiones netas se relaciona con diferencias en la superficie proyectada de esta categoría incluso antes de alcanzar los respectivos años meta.

En términos generales, *biomass* presenta una trayectoria de incremento hacia el final del periodo, con una separación progresiva entre la referencia y los escenarios de mitigación. Debido a que su superficie absoluta es menor que la de otras categorías, los cambios deben interpretarse considerando esta diferencia en escala.

4.3.2 *Crops*

La categoría *crops* presenta una trayectoria diferente a la observada en *biomass*. Durante la primera parte de la serie, las cuatro trayectorias permanecen prácticamente superpuestas, mientras que las diferencias comienzan a hacerse más visibles conforme avanza el periodo de proyección.

En 2050, la referencia presenta aproximadamente 254.1 mil km², mientras que los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060 presentan aproximadamente 243.5, 244.8 y 245.8 mil km², respectivamente. De esta manera, las tres trayectorias de mitigación presentan una superficie menor que la referencia, pero también muestran diferencias entre sí.

El escenario de cero emisiones netas al 2050 presenta la menor superficie de *crops* en este punto, mientras que el escenario con año meta 2060 presenta la mayor entre las tres trayectorias de mitigación. La diferencia entre los escenarios de mitigación es relativamente menor que la diferencia respecto a la referencia, pero permite observar que el horizonte temporal establecido para alcanzar cero emisiones netas se relaciona con diferencias en la trayectoria proyectada de esta categoría.

Después de 2050, las trayectorias mantienen diferencias entre sí, aunque continúan presentando una tendencia relativamente estable en comparación con otras categorías. La referencia permanece por encima de los tres escenarios de mitigación. En conjunto, *crops* constituye una de las categorías en las que se observa tanto una separación respecto a la referencia como una diferenciación entre los propios escenarios de cero emisiones netas.

4.3.3 *Forest (managed)*

La categoría *forest (managed)* presenta inicialmente una disminución en su superficie. Durante los primeros años de la serie, las cuatro trayectorias muestran un comportamiento prácticamente coincidente, con una reducción que alcanza valores menores hacia el periodo previo a 2015.

Posteriormente, se observa una recuperación de la superficie, seguida de un incremento gradual. A medida que avanza el periodo de proyección, las trayectorias comienzan a separarse ligeramente, aunque las tres correspondientes a cero emisiones netas permanecen próximas entre sí.

En 2050, la referencia presenta aproximadamente 29.6 mil km², mientras que los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060 presentan aproximadamente 32.3, 32.3 y 32.3 mil km², respectivamente. La diferencia entre las tres trayectorias de mitigación es, por tanto, muy pequeña en este año, mientras que la separación respecto a la referencia es más evidente.

Después de 2050, las tres trayectorias de mitigación mantienen valores similares, mientras que la referencia presenta un comportamiento que permite conservar una

separación respecto a ellas. En términos generales, esta categoría muestra una recuperación y crecimiento gradual posterior a la disminución inicial, con una diferenciación relativamente reducida entre los tres escenarios de cero emisiones netas.

4.3.4 *Forest (unmanaged)*

Forest (unmanaged) constituye una de las categorías con mayores superficies y una de las trayectorias en las que se observa una separación importante entre la referencia y los escenarios de cero emisiones netas.

Al inicio de la serie, las cuatro trayectorias presentan valores cercanos. Posteriormente, se observa una disminución inicial hasta aproximadamente 2010, seguida de un incremento pronunciado alrededor de 2015. Después de este incremento, las trayectorias presentan comportamientos diferenciados conforme avanza el periodo de proyección, como se muestra en las Figuras 16 y 17.

En 2050, la referencia presenta aproximadamente 426.9 mil km², mientras que los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060 presentan aproximadamente 446.9, 446.9 y 446.8 mil km², respectivamente. La separación entre la referencia y las tres trayectorias de mitigación es, por tanto, considerablemente mayor que la existente entre los propios escenarios de cero emisiones netas.

Después de 2050, la diferencia entre la referencia y los escenarios de mitigación continúa siendo visible. Las tres trayectorias de cero emisiones netas permanecen muy próximas entre sí, mientras que la referencia presenta una trayectoria diferenciada. En consecuencia, el principal contraste para esta categoría se encuentra entre el escenario de referencia y las trayectorias de mitigación, más que entre los distintos años meta.

La trayectoria de *forest (unmanaged)* muestra, por tanto, una disminución inicial, un incremento pronunciado en la parte intermedia de la serie y posteriormente una evolución diferenciada entre la referencia y los escenarios de cero emisiones netas. Esta categoría concentra una de las mayores diferencias absolutas entre trayectorias.

4.3.5 *Grass*

La categoría presenta una disminución importante a lo largo del periodo analizado. Al inicio de la serie, las cuatro trayectorias presentan superficies cercanas entre sí. Posteriormente, la categoría registra una reducción pronunciada, particularmente alrededor del periodo 2010–2015.

Después de esta reducción, las cuatro trayectorias presentan una evolución más gradual. Las diferencias entre escenarios se hacen visibles hacia el periodo de proyección, aunque las tres trayectorias de cero emisiones netas permanecen relativamente próximas.

En 2050, la referencia presenta aproximadamente 86.0 mil km², mientras que los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060 alcanzan aproximadamente 89.3, 89.2 y 89.2 mil km², respectivamente. Esto indica que las tres trayectorias de mitigación presentan superficies ligeramente superiores a la referencia, con diferencias muy pequeñas entre ellas.

Después de 2050, las tres trayectorias de mitigación continúan presentando valores próximos, mientras que la referencia mantiene una separación respecto a ellas. Por lo tanto, *grass* presenta un comportamiento en el que el principal contraste corresponde a la diferencia entre la referencia y los escenarios de mitigación, más que a diferencias importantes entre los distintos años meta.

4.3.6 *Otherarable*

La categoría *otherarable* presenta una trayectoria más gradual que otras categorías de mayor variación. Durante los primeros años se observa un incremento de la superficie, seguido posteriormente por una tendencia descendente.

Las cuatro trayectorias permanecen próximas durante buena parte de la serie, y la separación entre escenarios es relativamente pequeña. En 2050, la referencia presenta aproximadamente 90.7 mil km², mientras que los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060 presentan aproximadamente 90.4, 90.3 y 90.2 mil km², respectivamente.

Los valores muestran que los tres escenarios de mitigación presentan una superficie ligeramente menor que la referencia. Asimismo, la diferencia entre los propios escenarios de mitigación es reducida, aunque se observa una disminución gradual conforme se retrasa el año meta.

Después de 2050, las trayectorias mantienen valores cercanos, por lo que esta categoría no presenta una separación tan marcada entre escenarios como *forest (unmanaged)*, *shrubs* o *pasture (grazed)*. En términos generales, *otherarable* presenta una trayectoria de disminución gradual y una diferenciación relativamente limitada entre escenarios.

4.3.7 *Pasture (grazed)*

Pasture (grazed) presenta una trayectoria caracterizada por cambios pronunciados durante la parte intermedia de la serie y una posterior recuperación. Al inicio del periodo, las cuatro trayectorias permanecen prácticamente superpuestas, con valores cercanos a 293 mil km². Posteriormente, se observa una disminución que alcanza aproximadamente 270 mil km² alrededor de 2015, seguida de una recuperación gradual.

Después de este punto, las cuatro trayectorias comienzan a diferenciarse. La referencia presenta un crecimiento más pronunciado hacia el final del periodo,

mientras que las tres trayectorias de cero emisiones netas mantienen valores considerablemente más próximos entre sí.

En 2050, la referencia alcanza aproximadamente 358.2 mil km², mientras que los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060 presentan aproximadamente 325.5, 325.4 y 325.2 mil km², respectivamente. La separación entre la referencia y los tres escenarios de mitigación es, por tanto, considerablemente mayor que la diferencia existente entre estos últimos.

La figura muestra además que esta separación continúa aumentando después de 2050. Mientras la referencia mantiene una trayectoria ascendente y alcanza aproximadamente 375 mil km² hacia 2060, las tres trayectorias de cero emisiones netas permanecen cercanas entre sí, alrededor de 330–335 mil km². En consecuencia, *pasture (grazed)* constituye una de las categorías en las que la diferencia entre la referencia y las trayectorias de mitigación se vuelve más evidente hacia el final del horizonte temporal.

4.3.8 *Pasture (other)*

La trayectoria de *pasture (other)* presenta uno de los cambios más pronunciados de todo el conjunto de categorías. Durante la primera parte de la serie, las cuatro trayectorias son prácticamente coincidentes y muestran un incremento desde aproximadamente 480 mil km² hasta un máximo cercano a 510 mil km².

Posteriormente, alrededor de 2010–2015, se produce una reducción abrupta de la superficie, después de la cual las trayectorias continúan con una disminución gradual. A partir de este punto comienza a observarse una separación progresiva entre la referencia y los escenarios de cero emisiones netas.

En 2050, la referencia presenta aproximadamente 283.3 mil km², mientras que los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060 presentan aproximadamente 276.2, 276.5 y 276.3 mil km², respectivamente. Los tres escenarios de mitigación presentan, por tanto, valores inferiores a la referencia, aunque las diferencias entre ellos son pequeñas.

Después de 2050, la separación entre la referencia y los escenarios de mitigación continúa aumentando ligeramente. La referencia conserva valores superiores a los de las tres trayectorias de cero emisiones netas, mientras que estas permanecen relativamente próximas entre sí. En consecuencia, el comportamiento de esta categoría se caracteriza principalmente por una fuerte reducción en la parte intermedia de la serie y una posterior diferenciación entre la referencia y las trayectorias de mitigación.

4.3.9 *Rock and desert*

La categoría *rock and desert* presenta un comportamiento prácticamente idéntico entre las cuatro trayectorias. Durante la primera parte del periodo, la superficie se mantiene cercana a 0.5 mil km². Posteriormente, alrededor de 2015, se observa un incremento abrupto hasta aproximadamente 5.5 mil km².

Después de este cambio, la superficie permanece prácticamente constante durante el resto del periodo. Las cuatro trayectorias se mantienen superpuestas o prácticamente superpuestas tanto antes como después del incremento.

En consecuencia, en esta categoría no se observa una diferenciación apreciable asociada con los distintos escenarios de mitigación. El cambio más importante de la serie corresponde al incremento ocurrido alrededor de 2015, después del cual la superficie permanece estable. Para 2050 y los años posteriores, los cuatro escenarios presentan prácticamente el mismo valor.

4.3.10 *Shrubs*

La categoría *shrubs* presenta una trayectoria semejante a la observada en *forest (unmanaged)* durante la primera parte de la serie. Al inicio del periodo, las cuatro trayectorias presentan una superficie cercana a 310 mil km². Posteriormente, se registra una disminución hasta aproximadamente 280 mil km², seguida de un incremento pronunciado alrededor de 2015 que lleva la superficie hasta aproximadamente 405 mil km².

Después de este incremento, las trayectorias comienzan a diferenciarse. La referencia presenta una disminución gradual más pronunciada, mientras que las tres trayectorias de cero emisiones netas permanecen en valores superiores y relativamente próximos entre sí.

En 2050, la superficie proyectada de *shrubs* bajo los escenarios de cero emisiones netas se mantiene cercana a 390–395 mil km², mientras que la referencia presenta una superficie menor. Las diferencias entre los escenarios de mitigación son pequeñas en comparación con la separación respecto a la referencia.

Después de 2050, la diferenciación entre las trayectorias se vuelve más evidente. La referencia continúa disminuyendo, mientras que los escenarios de cero emisiones netas presentan una mayor estabilidad y permanecen agrupados. En 2060, esta separación es particularmente visible en la figura, ya que la referencia se encuentra por debajo de las tres trayectorias de mitigación.

Por lo tanto, *shrubs* presenta una trayectoria caracterizada por una disminución inicial, un incremento pronunciado alrededor de 2015 y una posterior reducción diferenciada entre la referencia y los escenarios de cero emisiones netas. Al igual que *forest (unmanaged)*, constituye una de las categorías en las que la separación entre referencia y mitigación es más evidente.

4.3.11 *Tundra*

La categoría *tundra* presenta superficies considerablemente menores que las categorías anteriores y muestra una trayectoria prácticamente coincidente entre los cuatro escenarios.

Al inicio de la serie, la superficie se encuentra alrededor de 0.089 mil km² y posteriormente disminuye hasta aproximadamente 0.069 mil km². Después de esta disminución se observa un incremento pronunciado alrededor de 2015, alcanzando aproximadamente 0.108 mil km².

A partir de ese momento, la superficie permanece prácticamente constante durante el resto del periodo. Las cuatro trayectorias se mantienen prácticamente superpuestas, sin una separación apreciable entre la referencia y los escenarios de cero emisiones netas.

En consecuencia, el comportamiento de *tundra* está determinado principalmente por las variaciones ocurridas durante la primera parte de la serie y por la estabilización posterior. El cambio en el año meta de los escenarios de mitigación no produce una diferenciación visible de la superficie proyectada para esta categoría.

4.3.12 *Urban*

La categoría presenta inicialmente un incremento de la superficie en las cuatro trayectorias. La superficie pasa de aproximadamente 8.5 mil km² al inicio de la serie hasta alrededor de 13.5 mil km² hacia 2010. Posteriormente, se observa una disminución pronunciada hasta aproximadamente 6.7 mil km².

Después de esta reducción, las cuatro trayectorias permanecen prácticamente constantes durante el resto del periodo. Las líneas correspondientes a los cuatro escenarios se mantienen prácticamente superpuestas, sin diferencias apreciables asociadas con el año meta de los escenarios de cero emisiones netas.

En 2050, por tanto, las cuatro trayectorias presentan aproximadamente el mismo valor y esta situación se mantiene posteriormente. El comportamiento de *urban* contrasta con el de categorías como *forest (unmanaged)*, *shrubs* o *pasture (grazed)*, en las que la separación entre la referencia y los escenarios de mitigación se incrementa durante el periodo de proyección.

4.3.13 Comparación general de las cuatro trayectorias

Considerando conjuntamente las categorías analizadas en las Figuras 16 y 17, las cuatro trayectorias presentan un comportamiento diferenciado según el tipo de USV. En algunas categorías, como forest (unmanaged), shrubs y pasture (grazed), la principal separación se observa entre la trayectoria de referencia y las tres trayectorias de cero emisiones netas. En estos casos, los escenarios de mitigación

permanecen relativamente próximos entre sí, mientras que la referencia sigue una trayectoria distinta.

En otras categorías, como crops y biomass, además de la separación respecto a la referencia se observa una diferenciación entre los propios escenarios de cero emisiones netas. Esto permite identificar que el año meta no solamente se relaciona con la magnitud del cambio respecto a la referencia en el año correspondiente, sino también con la trayectoria que sigue cada escenario antes y después de 2050.

Por otra parte, categorías como otherarable y pasture (other) presentan diferencias más pequeñas entre los escenarios de mitigación, aunque sí se observa una separación respecto a la referencia. En *pasture (other)*, esta diferenciación se vuelve progresivamente más visible hacia los últimos años de la serie, mientras que en *otherarable* las cuatro trayectorias permanecen relativamente próximas.

Finalmente, rock and desert, tundra y urban presentan trayectorias prácticamente coincidentes entre los cuatro escenarios durante la etapa de proyección. En estas categorías, las modificaciones observadas corresponden principalmente a cambios ocurridos en periodos anteriores y a una posterior estabilización, sin una diferenciación apreciable asociada con el año meta de los escenarios de cero emisiones netas.

El año 2050 permite identificar estas diferencias bajo un mismo momento temporal y, al mismo tiempo, observar la trayectoria posterior de los escenarios. No obstante, los valores observados en 2050 para los escenarios con metas 2055 y 2060 representan únicamente un punto dentro de sus respectivas trayectorias y no su condición final.

En conjunto, el análisis de las trayectorias muestra que la evolución temporal de las categorías de USV no es uniforme entre los escenarios. Mientras algunas categorías presentan una separación clara entre la referencia y las trayectorias de mitigación, otras muestran diferencias entre los propios escenarios de cero emisiones netas y algunas permanecen prácticamente coincidentes durante el periodo de proyección.

A partir de estas trayectorias, en el apartado siguiente se realiza una comparación cuantitativa utilizando 2050 como horizonte temporal común. Esta comparación permite evaluar simultáneamente los cuatro escenarios bajo una misma condición temporal y constituye la base para relacionar posteriormente las superficies proyectadas por GCAM con la información espacial correspondiente al análisis de conservación.

4.4 Cuantificación y comparación de las superficies proyectadas en el año 2050

Si bien el análisis de las trayectorias permitió identificar el comportamiento temporal de las categorías de uso del suelo y vegetación (USV), la comparación de las superficies proyectadas permite cuantificar las diferencias entre los escenarios bajo una misma condición temporal. Por ello, se tomó el año 2050 como punto común de

evaluación y se calcularon las diferencias absolutas de superficie entre el escenario de referencia y cada uno de los escenarios de cero emisiones netas: 2050, 2055 y 2060. De esta manera, los tres escenarios de mitigación se comparan respecto a la misma referencia y en el mismo año, independientemente de su respectivo año meta.

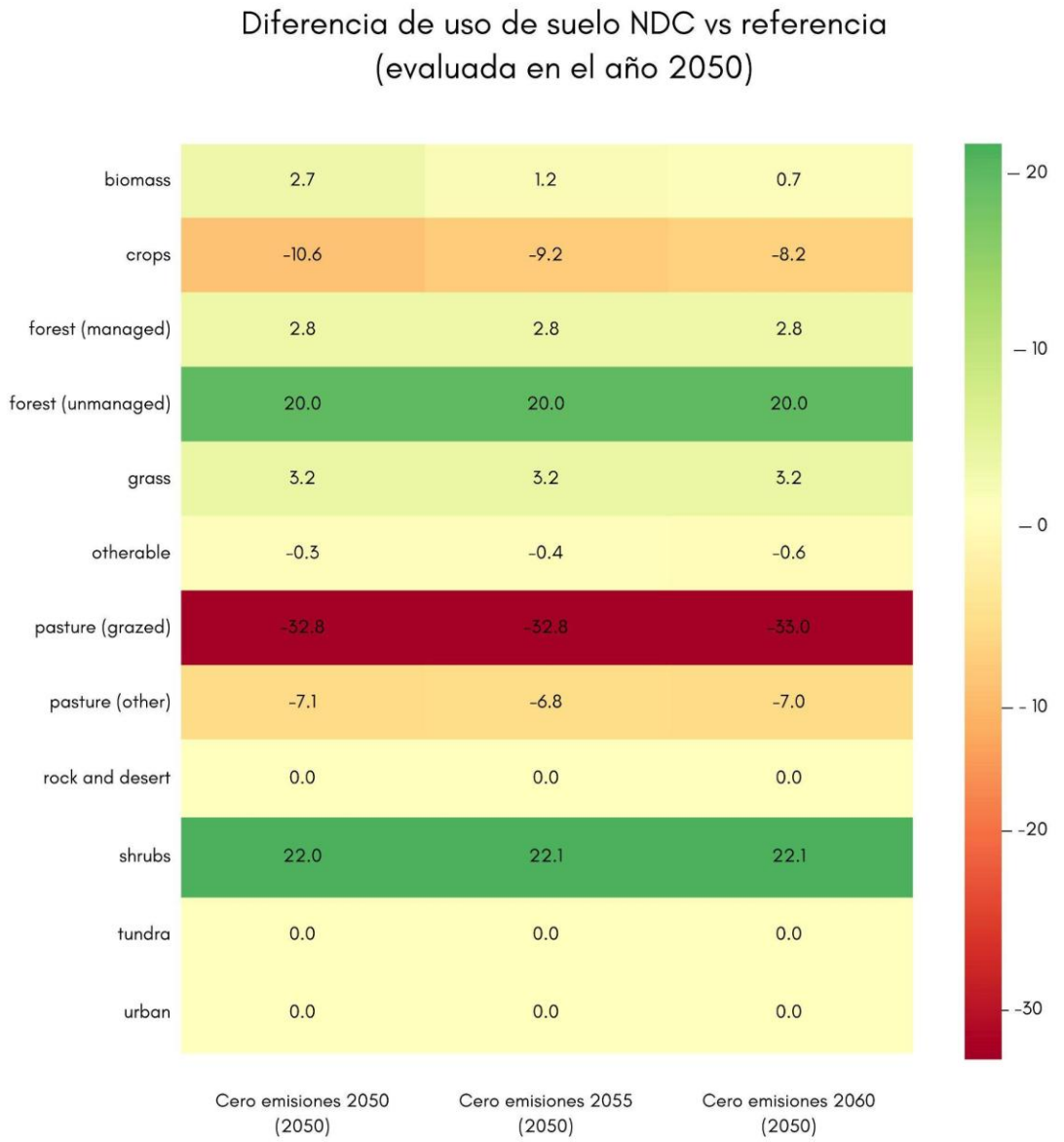
Los valores utilizados para realizar esta comparación se obtuvieron a partir de las tablas de superficies proyectadas por categoría de USV para cada uno de los cuatro escenarios, las cuales se presentan de manera completa en el Anexo C. A partir de estos datos se calculó, para cada categoría, la diferencia entre la superficie proyectada bajo cada escenario de cero emisiones netas y la correspondiente al escenario de referencia en 2050. Los resultados se expresan en miles de km² y se presentan en la Tabla 15 y en la Figura 18.

Tabla 15. Diferencias de superficie por categoría de uso del suelo y vegetación entre los escenarios de cero emisiones netas y el escenario de referencia en 2050.

Categoría de USV	Cero emisiones 2050	Cero emisiones 2055	Cero emisiones 2060
Biomass	2.69	1.20	0.74
Crops	-10.57	-9.22	-8.25
forest (managed)	2.79	2.75	2.75
forest (unmanaged)	19.98	19.97	19.95
Grass	3.24	3.23	3.20
Otherarable	-0.35	-0.41	-0.57
pasture (grazed)	-32.76	-32.83	-32.98
pasture (other)	-7.07	-6.77	-6.96
rock and desert	0.00	0.00	0.00
Shrubs	22.05	22.09	22.10
Tundra	0.00	0.00	0.00
Urban	0.00	0.00	0.00

Nota: Valores expresados en miles de km². Los valores positivos indican una superficie proyectada mayor respecto al escenario de referencia en 2050 y los valores negativos una superficie menor. Los escenarios de cero emisiones netas al 2055 y 2060 corresponden a sus superficies proyectadas en 2050 y no a sus respectivos años meta.
Fuente: Elaboración propia con datos de GCAM (2025) y PINCC (2025).

Figura 18. Diferencia de superficie por categoría de uso del suelo y vegetación entre los escenarios de cero emisiones netas y el escenario de referencia en 2050 (miles de km²).



Fuente: Elaboración propia con datos de GCAM (2025) y PINCC (2025).

Como se observa en la Tabla 15 y la Figura 18, cuyos valores de diferencia se obtuvieron a partir de los datos de superficie por categoría de uso del suelo presentados en el Anexo C, los tres escenarios de cero emisiones netas presentan un patrón similar en cuanto a la dirección de las diferencias respecto al escenario de referencia. Las categorías *shrubs, forest (unmanaged), grass, forest (managed)* y *biomass* presentan diferencias positivas en los tres escenarios, mientras *que pasture (grazed), crops, pasture (other)* y *otherarable* presentan diferencias negativas. Por su parte, *rock and desert, tundra* y *urban* no presentan diferencias respecto a la referencia.

Las diferencias positivas de mayor magnitud corresponden a shrubs y forest (unmanaged). Para shrubs, los valores son de +22.05, +22.09 y +22.10 mil km² en los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060, respectivamente. En forest (unmanaged), las diferencias son de +19.98, +19.97 y +19.95 mil km². En ambas categorías, las diferencias respecto a la referencia son similares entre los tres escenarios de mitigación.

Entre las demás categorías con diferencias positivas, grass presenta valores de +3.24, +3.23 y +3.20 mil km² para los escenarios 2050, 2055 y 2060, respectivamente. En forest (managed), las diferencias corresponden a +2.79, +2.75 y +2.75 mil km². En estas dos categorías, al igual que en forest (unmanaged) y shrubs, las diferencias entre los tres escenarios de mitigación son reducidas.

La categoría *biomass* presenta un comportamiento distinto en cuanto a la magnitud de las diferencias entre escenarios. La diferencia respecto a la referencia es de +2.69 mil km² para el escenario de cero emisiones netas al 2050, disminuye a +1.20 mil km² para el escenario al 2055 y alcanza +0.74 mil km² para el escenario al 2060. Aunque los tres valores permanecen por encima de la referencia, la magnitud de la diferencia es menor en los escenarios con años meta posteriores.

Entre las categorías con diferencias negativas, *pasture (grazed)* presenta los valores de mayor magnitud absoluta en los tres escenarios: −32.76 mil km² en el escenario al 2050, −32.83 mil km² en el escenario al 2055 y −32.98 mil km² en el escenario al 2060. Las diferencias entre las tres trayectorias de mitigación son pequeñas en comparación con su separación respecto al escenario de referencia.

La categoría *crops* presenta diferencias de −10.57, −9.22 y −8.25 mil km² para los escenarios de cero emisiones netas al 2050, 2055 y 2060, respectivamente. En este caso, la magnitud de la diferencia negativa disminuye conforme se considera un escenario con un año meta posterior. De esta manera, aunque los tres escenarios presentan una superficie menor que la referencia en 2050, existe una diferenciación entre las tres trayectorias de mitigación.

En *pasture (other)* se registran diferencias de −7.07, −6.77 y −6.96 mil km² en los escenarios 2050, 2055 y 2060, respectivamente. Los tres valores son próximos entre sí y se mantienen por debajo del escenario de referencia. Por su parte, *otherarable* presenta las diferencias negativas de menor magnitud, con −0.35, −0.41 y −0.57 mil km², respectivamente.

Las categorías *rock and desert, tundra* y *urban* presentan diferencias iguales a cero en los tres escenarios de cero emisiones netas respecto al escenario de referencia. Por lo tanto, para el año 2050, las superficies proyectadas para estas categorías son iguales entre las cuatro trayectorias consideradas.

Al comparar exclusivamente los tres escenarios de cero emisiones netas, la mayor parte de las categorías presenta diferencias relativamente pequeñas entre las superficies proyectadas en 2050. Esto se observa particularmente en *forest (unmanaged), shrubs, forest (managed), grass* y *pasture (grazed)*, cuyos valores de diferencia respecto a la referencia permanecen próximos entre los tres escenarios. En contraste, *biomass* y *crops* presentan una diferenciación más visible entre las trayectorias con metas en 2050, 2055 y 2060.

En conjunto, la comparación cuantitativa muestra que los tres escenarios de cero emisiones netas conservan en 2050 la misma dirección general de las diferencias respecto al escenario de referencia para las categorías analizadas, aunque la magnitud varía entre escenarios en determinadas categorías. Las mayores diferencias positivas corresponden a shrubs y forest (unmanaged), mientras que la mayor diferencia negativa se presenta en pasture (grazed). Asimismo, biomass y crops muestran una mayor diferenciación entre los tres escenarios de mitigación, mientras que urban, rock and desert y tundra permanecen sin diferencias.

Capítulo 5: Discusión de resultados y conclusiones

5.1 Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos permiten examinar la relación entre las trayectorias de mitigación del cambio climático y las modificaciones proyectadas en las categorías de uso del suelo y vegetación (USV) consideradas por GCAM. En conjunto, los escenarios de cero emisiones netas muestran diferencias respecto al escenario de referencia tanto en la magnitud de las superficies proyectadas como en su evolución temporal. Sin embargo, estas diferencias no son homogéneas entre las categorías de USV ni entre los distintos horizontes considerados, por lo que su interpretación requiere considerar los supuestos incorporados en la construcción de los escenarios, el horizonte temporal de comparación y las características propias de la representación del uso del suelo en el modelo.

En este sentido, los resultados deben entenderse como el comportamiento de un sistema modelado bajo condiciones específicas y no como una predicción determinística de la configuración futura del territorio mexicano. Los escenarios analizados incorporan supuestos que modifican las condiciones bajo las cuales evoluciona el sistema de uso del suelo. Entre ellos se encuentran la recalibración de los usos históricos del suelo para México en GCAM a partir de las series de uso del suelo y vegetación de INEGI, el establecimiento de una tasa de cero deforestación neta a partir de 2030 en los escenarios de cero emisiones netas, así como modificaciones relacionadas con el consumo de proteínas animales y la reducción del desperdicio de alimentos. En consecuencia, las diferencias obtenidas respecto al escenario de referencia representan la respuesta conjunta del modelado bajo el conjunto de condiciones establecidas para cada trayectoria y no el efecto aislado de una sola medida de mitigación.

Esta consideración resulta particularmente importante para interpretar las modificaciones observadas en las categorías de USV. GCAM representa las superficies correspondientes a los distintos usos del suelo en cada periodo, pero los resultados utilizados en este análisis no permiten establecer directamente las conversiones específicas entre una categoría y otra. Por esta razón, una disminución de superficie en una categoría y un incremento simultáneo en otra no constituyen evidencia suficiente para afirmar que la primera se transformó directamente en la segunda. Las variaciones identificadas deben interpretarse, por tanto, como diferencias en la distribución de superficies proyectadas entre escenarios y no como matrices explícitas de transición territorial.

A partir de esta consideración, uno de los patrones principales de los resultados corresponde a la coexistencia de diferencias positivas y negativas respecto al escenario de referencia. Las trayectorias de cero emisiones netas presentan mayores superficies relativas en determinadas categorías de GCAM y menores superficies en

otras, mientras que algunas permanecen prácticamente sin diferencias. Este comportamiento muestra que la respuesta territorial asociada con los escenarios de mitigación no se concentra en una única categoría de USV, sino que involucra modificaciones simultáneas en los distintos componentes del sistema de uso del suelo.

La magnitud de estas diferencias tampoco es uniforme entre las trayectorias de mitigación. La comparación de cada escenario en su respectivo año meta muestra variaciones que pueden parecer más pronunciadas conforme se modifica el horizonte temporal. Sin embargo, los resultados obtenidos al utilizar 2050 como punto común de evaluación muestran que una parte importante de las diferencias entre los escenarios con metas en 2050, 2055 y 2060 se reduce cuando las trayectorias se observan bajo una misma condición temporal. Por ello, la interpretación de las diferencias entre escenarios debe distinguir entre los cambios asociados con la trayectoria de mitigación y aquellos relacionados con el momento en que se realiza la comparación.

Esta distinción temporal constituye un elemento central para la evaluación de la consistencia entre mitigación y conservación. Si las trayectorias se compararan exclusivamente en sus respectivos años meta, las diferencias observadas incorporarían simultáneamente la configuración particular de cada escenario y la evolución del sistema entre 2050, 2055 y 2060. La utilización de 2050 como horizonte común permite reducir esta fuente de variación proporcionando una base temporal homogénea para el análisis posterior de la relación entre las modificaciones proyectadas del uso del suelo y las áreas consideradas dentro de los objetivos de conservación.

La relación entre mitigación y conservación, no obstante, no puede establecerse únicamente a partir de la dirección de los cambios de superficie. Una diferencia positiva en una categoría de cobertura vegetal no constituye por sí misma evidencia de un beneficio para la conservación, de la misma manera que una reducción de una categoría de uso agropecuario no implica automáticamente una recuperación ecológica. La consistencia entre ambas agendas depende también de la naturaleza de las coberturas involucradas, de su localización espacial y de su correspondencia con las áreas e instrumentos considerados en el análisis de conservación. Por esta razón, los resultados de GCAM constituyen el punto de partida para evaluar posibles relaciones de compatibilidad o tensión, pero requieren ser interpretados conjuntamente con el componente espacial desarrollado en esta investigación.

Bajo este enfoque, la discusión se estructura a partir de tres elementos principales: el comportamiento de las categorías de USV bajo las trayectorias de mitigación, la influencia del horizonte temporal sobre la comparación de los escenarios y la relación de las modificaciones territoriales proyectadas con los objetivos de conservación. Esta estructura permite discutir los resultados desde las condiciones propias de la modelación hasta sus implicaciones para el problema central de la investigación,

manteniendo una distinción entre las diferencias observadas en los escenarios y las interpretaciones que pueden derivarse de ellas.

5.1.1 Interpretación de los cambios en el uso del suelo bajo los escenarios de mitigación

Los resultados obtenidos muestran que las trayectorias de cero emisiones netas presentan una configuración del uso del suelo distinta a la proyectada en el escenario de referencia. Las diferencias se concentran principalmente en categorías asociadas con coberturas vegetales y usos agropecuarios, mientras que otras categorías presentan modificaciones de menor magnitud o permanecen sin cambios entre los escenarios. En particular, al evaluar las tres trayectorias bajo un horizonte temporal común en 2050, se observan mayores superficies relativas de *shrubs* y *forest (unmanaged)* respecto al escenario de referencia, acompañadas de menores superficies de *pasture (grazed)*, *crops* y *pasture (other)*. Este patrón constituye uno de los principales resultados del análisis, debido a que muestra que las trayectorias de mitigación consideradas se encuentran asociadas con una configuración territorial diferente a aquella proyectada en ausencia de las medidas adicionales incluidas en los escenarios.

Para interpretar estas diferencias es necesario considerar la forma en que GCAM representa la competencia por el territorio. El componente de uso del suelo del modelo utiliza una estructura jerárquica de asignación en la que diferentes usos compiten por la superficie disponible. Dentro de esta estructura se distinguen, entre otras categorías, tierras de cultivo, bosques manejados y no manejados, matorrales, herbazales, pastizales manejados y no manejados, otras tierras arables y cultivos destinados a la producción de biomasa. La superficie asignada a cada categoría depende de su participación dentro de los niveles correspondientes del asignador de tierras y de las condiciones económicas, productivas y de política representadas en el escenario (JGCRI, 2026). Por ello, un incremento o disminución de una categoría debe interpretarse, en primera instancia, como un cambio en la superficie que GCAM asigna a ese uso o cobertura bajo un escenario determinado y no necesariamente como una conversión directa desde o hacia otra categoría específica.

La interpretación de este comportamiento debe realizarse además considerando los supuestos bajo los cuales fueron construidas las trayectorias analizadas. Entre las condiciones incorporadas en los escenarios de cero emisiones netas se encuentra el establecimiento de una tasa de cero deforestación neta en México a partir de 2030, mientras que en el escenario de referencia la deforestación continúa a una tasa aproximada de 0.2 % anual de la cubierta forestal total. Asimismo, se incorporaron modificaciones relacionadas con el consumo de proteínas animales y la reducción del desperdicio de alimentos. Por consiguiente, las diferencias observadas en las superficies proyectadas deben entenderse como la respuesta integrada del sistema de uso del suelo ante el conjunto de condiciones consideradas en cada escenario y no como el efecto aislado de una única medida de mitigación.

Esta consideración es consistente con lo señalado por Springmann et al. (2018), quienes analizaron distintas opciones para disminuir las presiones ambientales asociadas con el sistema alimentario, incluyendo cambios hacia patrones alimentarios

con mayor participación de alimentos de origen vegetal, mejoras tecnológicas y de manejo, así como reducciones en las pérdidas y desperdicios de alimentos. Los autores encontraron que ninguna de estas medidas, considerada de manera aislada, resulta suficiente para mantener simultáneamente las distintas presiones ambientales del sistema alimentario dentro de los límites evaluados, por lo que plantean la necesidad de combinar diferentes intervenciones. Esta conclusión resulta pertinente para la interpretación de los escenarios analizados en la presente investigación, ya que impide atribuir las modificaciones proyectadas del uso del suelo exclusivamente a un solo supuesto y refuerza la necesidad de entenderlas como el resultado conjunto de las condiciones incorporadas en la modelación.

En la estructura de GCAM, las tierras de pastoreo se dividen entre *managed pasture*, correspondiente a las superficies de pastoreo utilizadas para alimentar al ganado que forma parte del sistema productivo representado por el modelo, y *unmanaged pasture*. Esta diferenciación corresponde, respectivamente, a las categorías utilizadas en este análisis como *pasture (grazed)* y *pasture (other)*. Ambas compiten dentro del nodo de tierras de pastoreo del asignador de suelo de GCAM (JGCRI, 2026). En consecuencia, una disminución de *pasture (grazed)* representa una menor superficie asignada al pastoreo vinculado con la producción ganadera modelada, mientras que un incremento representaría una mayor superficie destinada a este uso. De manera semejante, una disminución de *pasture (other)* indica una menor superficie correspondiente al componente de pastizal no manejado representado por GCAM. Estos cambios describen modificaciones en la asignación de superficie y no identifican por sí mismos el uso hacia el cual se desplazó el territorio.

Dentro de este patrón general, la disminución de *pasture (grazed)* adquiere especial relevancia por tratarse de la categoría que presenta la mayor diferencia negativa respecto al escenario de referencia en el horizonte común de 2050. Esta reducción coincide con uno de los supuestos considerados en los escenarios relacionado con modificaciones en el consumo de proteínas animales. Sin embargo, la coincidencia entre ambas características no permite establecer por sí misma una relación causal directa. Los resultados disponibles no permiten aislar el efecto individual de este supuesto respecto de las demás condiciones incluidas en las trayectorias de cero emisiones netas.

Aun con esta precaución, la dirección del cambio observado es consistente con investigaciones que han identificado una relación entre los patrones de consumo alimentario y los requerimientos territoriales del sistema agropecuario. Para México, Ibarrola-Rivas et al. (2022) estimaron los requerimientos de superficie asociados con distintos patrones alimentarios y encontraron que dietas saludables y sostenibles podrían requerir entre 20 % y 50 % menos superficie agrícola que la dieta promedio considerada en su estudio, dependiendo de la recomendación de dieta utilizada. Entre las modificaciones necesarias identificaron una reducción de la demanda de pastizales, además de cambios en la distribución de la superficie destinada a diferentes cultivos. Estos resultados no constituyen una validación cuantitativa de las superficies obtenidas mediante GCAM, ya que ambos estudios responden a metodologías, supuestos y objetivos diferentes; no obstante, proporcionan evidencia independiente de que modificaciones en los patrones alimentarios pueden estar asociadas con cambios importantes en los requerimientos de suelo agropecuario en México.

La relación entre dieta y demanda territorial ha sido identificada también en investigaciones más recientes para el contexto mexicano. Unar-Munguía et al. (2024), al evaluar las Guías Alimentarias Saludables y Sostenibles de México de 2023, estimaron que una dieta acorde con dichas recomendaciones requeriría aproximadamente 30 % menos superficie para su producción que las dietas actuales consideradas en el estudio. Los autores relacionan una parte importante de esta reducción con un menor consumo de alimentos de origen animal, particularmente carne roja, además de cambios en otros componentes de la dieta. En conjunto con los resultados de Ibarrola-Rivas et al. (2022), esta evidencia muestra que la modificación de los patrones alimentarios puede disminuir la demanda territorial asociada con la producción de alimentos en México, lo cual proporciona un marco de comparación pertinente para interpretar la menor superficie relativa de categorías agropecuarias observada en los escenarios de mitigación.

Esta interpretación encuentra además respaldo en la evaluación global del IPCC. El Sexto Informe de Evaluación reconoce que las medidas del lado de la demanda, entre ellas la transición hacia dietas saludables y sostenibles y la reducción del desperdicio alimentario, forman parte del potencial de mitigación del sector de Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU). Particularmente, el IPCC señala que la intensificación sostenible, los cambios en la dieta y la reducción del desperdicio pueden aumentar la eficiencia del sistema alimentario y disminuir los requerimientos de superficie agrícola, creando condiciones que faciliten otras medidas del lado de la oferta, como la reducción de la deforestación y la restauración de ecosistemas (IPCC, 2022). De esta manera, la reducción relativa de categorías agropecuarias observada en los escenarios analizados es consistente, en términos generales, con relaciones entre demanda alimentaria y requerimientos territoriales identificadas en evaluaciones integradas de mitigación.

No obstante, la disminución de *pasture (grazed)* no debe interpretarse como evidencia de que esa superficie se transforma directamente en *forest (unmanaged)*, *shrubs* u otra categoría. La información utilizada para construir los escenarios señala que GCAM modela los montos de uso del suelo correspondientes a cada periodo sin proporcionar, a partir de estas salidas, la distribución específica de las conversiones entre los distintos usos. En consecuencia, la disminución simultánea de determinadas categorías agropecuarias y el incremento de determinadas categorías de vegetación representa un patrón de redistribución de superficies dentro de las trayectorias modeladas, pero no constituye una matriz explícita de transición que permita determinar el origen de cada superficie.

GCAM diferencia los bosques manejados de los no manejados dentro de su estructura de asignación territorial. Los primeros forman parte de los usos manejados asociados con actividades productivas forestales, mientras que *forest (unmanaged)* corresponde al componente forestal no manejado dentro del asignador de tierras. Ambos se encuentran dentro del nodo forestal y compiten, dentro de la estructura jerárquica del modelo, con otros usos del territorio (JGCRI, 2026). Por tanto, un incremento de *forest (managed)* indica una mayor superficie asignada por el modelo al uso forestal manejado, mientras que su disminución indica una menor superficie relativa destinada a éste. En *forest (unmanaged)*, un incremento representa una mayor superficie que permanece o es asignada a la categoría forestal no manejada en la trayectoria modelada; una disminución representa el comportamiento

contrario. Ninguno de estos cambios permite identificar por sí mismo si la diferencia proviene de reforestación, regeneración, conservación o conversión desde un uso específico.

Esta distinción es particularmente importante para interpretar el incremento relativo de *forest (unmanaged)*. La mayor superficie de esta categoría respecto al escenario de referencia es coherente con la existencia del supuesto de cero deforestación neta incorporado a partir de 2030 en los escenarios de cero emisiones. Sin embargo, no es metodológicamente adecuado interpretar la diferencia completa de *forest (unmanaged)* como superficie reforestada, restaurada o recuperada exclusivamente como consecuencia de dicha medida. El resultado representa una diferencia entre dos trayectorias modeladas y refleja el funcionamiento conjunto de los supuestos incorporados en cada una.

GCAM representa *shrubs* y *grass* como categorías de tierras no manejadas y las mantiene diferenciadas dentro del asignador para representar de manera específica su posibilidad de sustitución entre ellas y con otros usos del territorio (JGCRI, 2026). Por ello, un aumento de *shrubs* significa que el escenario asigna una mayor superficie a tierras clasificadas como matorral respecto al escenario de comparación, mientras que una disminución significa una superficie menor. Análogamente, un aumento de *grass* representa una mayor superficie asignada a la categoría de vegetación herbácea no manejada y una disminución representa una menor superficie. En ambos casos, la dirección del cambio describe la extensión de la categoría modelada, pero no constituye por sí misma un indicador de mejora o deterioro ecológico.

Esta precaución es especialmente relevante para *shrubs*, que presenta una de las mayores diferencias positivas respecto al escenario de referencia. Un incremento de superficie dentro de una categoría de vegetación no constituye necesariamente un indicador de recuperación ecológica. La superficie constituye únicamente una dimensión de la condición de los ecosistemas y no informa, por sí misma, sobre aspectos como composición, estructura, conectividad, estado de conservación o calidad del hábitat. Por ello, el incremento de *shrubs* resulta relevante para caracterizar la redistribución territorial proyectada por GCAM, pero su significado para la conservación debe analizarse posteriormente mediante la información espacial y ecológica incorporada en esta investigación.

La categoría *crops* comprende las superficies destinadas a los diferentes cultivos agrícolas representados por GCAM, entre ellos productos alimentarios y otros productos agrícolas. Dentro del modelo, las tierras de cultivo se subdividen posteriormente de acuerdo con características como riego y manejo (JGCRI, 2026). Una disminución de *crops* indica, por tanto, que bajo el escenario analizado GCAM asigna una menor superficie total a los cultivos comprendidos en esta categoría respecto al escenario de referencia, mientras que un incremento indicaría una mayor superficie. Este resultado no debe interpretarse directamente como una reducción o aumento proporcional de la producción agrícola, ya que la superficie constituye únicamente una de las variables que intervienen en el sistema productivo representado por el modelo.

La reducción de *crops* constituye otro componente relevante del patrón observado. Su comportamiento, junto con el de las categorías de pastizal, debe analizarse dentro

de un sistema alimentario en el que las modificaciones en la demanda pueden afectar simultáneamente los requerimientos de diferentes tipos de superficie. Ibarrola-Rivas et al. (2022), por ejemplo, muestran que una reducción en la demanda total de tierra agrícola no implica necesariamente una disminución uniforme de todos sus componentes: sus escenarios requieren modificaciones en la distribución entre pastizales y tierras de cultivo y entre diferentes tipos de cultivos. Por esta razón, las diferencias negativas observadas para *crops* en GCAM no deberían interpretarse aisladamente como una contracción general de la actividad agrícola, sino como parte de una configuración distinta de la superficie proyectada bajo las condiciones de los escenarios de mitigación.

La reducción del desperdicio alimentario incorporada en los escenarios constituye otro elemento potencialmente relacionado con este comportamiento. El IPCC (2022) señala que la reducción de pérdidas y desperdicios alimentarios puede disminuir la competencia por la tierra y otras presiones ambientales, y estima con alta confianza que estas medidas pueden liberar superficies que de otra manera serían requeridas por el sistema alimentario. De manera similar, Springmann et al. (2018) muestran que la reducción de pérdidas y desperdicios puede contribuir a disminuir las presiones ambientales de la producción alimentaria, particularmente cuando se combina con cambios de dieta y mejoras en las prácticas productivas. En los escenarios aquí analizados, por tanto, la reducción del desperdicio constituye otro componente que puede contribuir a explicar la configuración territorial obtenida, aunque su efecto individual no puede separarse de los demás supuestos de la modelación.

Para GCAM, la biomasa representada dentro del sistema de uso del suelo corresponde a cultivos dedicados a la producción de energía. La documentación actual del modelo distingue un cultivo energético herbáceo dentro del nodo de tierras de cultivo y una opción de biomasa leñosa dentro del componente forestal; además, los cultivos energéticos dedicados son introducidos en los periodos futuros del modelo, en lugar de formar parte de la superficie agrícola histórica de referencia (JGCRI, 2026). En consecuencia, para la categoría *biomass* utilizada en las salidas de esta investigación, un aumento de superficie debe interpretarse como una mayor asignación territorial a la producción de biomasa energética bajo la trayectoria correspondiente, mientras que una disminución indica una menor superficie destinada a este uso. Esto explica también por qué la categoría adquiere particular interés en escenarios de mitigación: su expansión implica una mayor demanda de tierra para producción de biomasa y, por tanto, puede interactuar con otros usos que compiten por el territorio.

Los resultados muestran que *biomass* presenta una mayor separación entre las tres trayectorias de cero emisiones netas que *forest (unmanaged)* y *shrubs* cuando se comparan en 2050. Este comportamiento indica que las modificaciones del sistema de uso del suelo no son uniformes frente a las diferentes trayectorias de mitigación y que la interpretación de una categoría no puede extrapolarse directamente al conjunto de usos representados por GCAM.

Esta diferencia adquiere particular relevancia debido a que las estrategias de mitigación basadas en tierra pueden generar competencia por un recurso territorial limitado. El IPCC (2022) advierte que las medidas de mitigación del sector AFOLU presentan interacciones con la producción de alimentos, la biodiversidad, los servicios

ecosistémicos y otros objetivos ambientales y sociales. Por ello, sus resultados dependen de la escala, el tipo de intervención y las condiciones específicas del territorio. La expansión de determinados usos asociados con la mitigación no debe considerarse automáticamente favorable desde una perspectiva ambiental, ya que puede generar cobeneficios o compensaciones dependiendo de la forma y del lugar en que se implemente.

GCAM incluye además la categoría *other arable land*, que representa principalmente tierras agrícolas en barbecho o tierras cultivables que no se encuentran en uso productivo activo. Esta categoría se considera no manejada dentro del nodo de tierras de cultivo (JGCRI, 2026). Por ello, un aumento de *other arable* representa una mayor superficie cultivable no utilizada activamente, mientras que una disminución indica que una menor superficie permanece en esta condición. Sin información explícita sobre las transiciones, una disminución no permite determinar a qué uso fue reasignada dicha superficie.

Finalmente, categorías como *urban*, *water*, *rock and desert* y *tundra* representan superficies que se encuentran fuera de los principales usos agroforestales entre los cuales se produce la competencia territorial analizada por el asignador de tierras. En el contexto de esta investigación, un aumento o disminución de cualquiera de ellas debe interpretarse únicamente como una diferencia en la superficie correspondiente a dicha categoría entre escenarios. Cuando no presentan diferencias, como ocurre con varias de estas categorías en la comparación realizada, el resultado indica que los escenarios considerados no modifican su superficie respecto al escenario de referencia en el horizonte analizado. La estabilidad de estas categorías no implica necesariamente ausencia de cambios ambientales en ellas, sino únicamente ausencia de diferencias de superficie detectables mediante esta variable de salida de GCAM.

Esta consideración resulta particularmente importante para el propósito de la presente investigación. El IPCC (2022) señala que las medidas de mitigación basadas en tierra pueden generar beneficios adicionales para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos cuando se implementan de manera adecuada, pero también pueden producir compensaciones con la conservación de hábitats, la seguridad alimentaria, la disponibilidad de agua y otros servicios cuando su diseño o implementación resultan inadecuados. Por lo tanto, la dirección de un cambio de superficie no es suficiente para determinar su compatibilidad con los objetivos de conservación.

Desde esta perspectiva, una mayor superficie relativa de *forest (unmanaged)* o *shrubs* no puede equipararse automáticamente con una mejora de la conservación, de la misma manera que una reducción de *pasture (grazed)* o *crops* no constituye necesariamente un beneficio ambiental. Los efectos de las medidas basadas en tierra dependen del contexto ecológico, productivo y territorial en el que ocurren (IPCC, 2022). Esta consideración justifica la necesidad de complementar los resultados agregados de GCAM con el análisis espacial desarrollado en esta investigación.

En conjunto, la comparación con la literatura permite establecer que la dirección general de varios de los cambios obtenidos en los escenarios de cero emisiones netas es consistente con procesos identificados en estudios previos sobre mitigación y

sistemas alimentarios. La evidencia internacional muestra que los cambios hacia dietas sostenibles, la reducción del desperdicio de alimentos y otras transformaciones del sistema alimentario pueden disminuir la demanda de suelo agrícola y facilitar medidas relacionadas con la reducción de la deforestación y la recuperación de ecosistemas (Springmann et al., 2018; IPCC, 2022). Para México, los estudios de Ibarrola-Rivas et al. (2022) y Unar-Munguía et al. (2024) muestran igualmente que modificaciones hacia patrones alimentarios más sostenibles pueden reducir los requerimientos territoriales asociados con la producción de alimentos.

Sin embargo, la coincidencia entre estos resultados y la literatura no demuestra que las diferencias proyectadas por GCAM puedan atribuirse exclusivamente a cambios en la dieta, al desperdicio alimentario o a la política de cero deforestación neta. Los escenarios analizados incorporan simultáneamente estas y otras condiciones, por lo que el principal resultado consiste en identificar que las trayectorias de mitigación generan una configuración del uso del suelo diferente a la del escenario de referencia y que algunos de los patrones obtenidos son consistentes con mecanismos y respuestas territoriales documentados previamente.

Esta distinción es fundamental para la evaluación posterior de la consistencia entre mitigación y conservación. Los cambios proyectados por GCAM permiten identificar superficies y categorías potencialmente relevantes para analizar estas interacciones, pero no permiten determinar por sí solos que exista una mejora o un deterioro de la conservación. Para ello resulta necesario considerar dónde se localizan territorialmente las modificaciones y cómo se relacionan con las áreas y objetivos de conservación incluidos en esta investigación.

5.1.2 Influencia del horizonte temporal en la comparación de las trayectorias de mitigación

El horizonte temporal constituye un elemento fundamental para interpretar las diferencias entre las trayectorias de mitigación analizadas. Los escenarios considerados fueron construidos para alcanzar las cero emisiones netas en años distintos —2050, 2055 y 2060—, por lo que la comparación de cada trayectoria en su respectivo año meta incorpora simultáneamente dos dimensiones: las características particulares de cada escenario y la evolución temporal del sistema de uso del suelo. Esta distinción es relevante debido a que las superficies correspondientes a las categorías de USV continúan modificándose a lo largo del periodo de análisis, tanto en el escenario de referencia como en los escenarios de mitigación.

La comparación de cada escenario de cero emisiones netas con el escenario de referencia en su respectivo año meta permite identificar cuánto difiere la configuración proyectada del uso del suelo respecto a la trayectoria de referencia en el momento en que cada escenario alcanza su objetivo. Bajo este enfoque se observan diferencias en la magnitud de los cambios entre 2050, 2055 y 2060, particularmente en algunas de las categorías que presentan las mayores variaciones de superficie. Sin embargo, estas diferencias no deben interpretarse directamente como el efecto de adelantar o

retrasar el cumplimiento de las cero emisiones netas, debido a que cada comparación corresponde también a un momento temporal diferente.

Esta consideración resulta especialmente importante porque el escenario de referencia tampoco permanece constante. Las superficies proyectadas bajo esta trayectoria continúan evolucionando entre 2050 y 2060, de manera que la referencia utilizada para calcular las diferencias en 2055 no es la misma configuración territorial que la utilizada en 2050, y lo mismo ocurre en 2060. Por consiguiente, una mayor o menor diferencia observada en un año meta posterior puede estar relacionada tanto con la evolución del escenario de mitigación como con la evolución de la propia trayectoria de referencia. Esta característica impide atribuir las diferencias entre los resultados correspondientes a 2050, 2055 y 2060 exclusivamente al año establecido para alcanzar las cero emisiones netas.

Por esta razón, la comparación realizada en los respectivos años meta y la comparación efectuada bajo un horizonte temporal común responden a preguntas diferentes. La primera permite analizar cómo se diferencia cada escenario respecto a la referencia cuando alcanza su propia meta de cero emisiones netas. La segunda permite analizar cómo se diferencian las distintas trayectorias cuando son observadas en un mismo momento. Ambas aproximaciones aportan información relevante, pero sus resultados no son directamente intercambiables.

La utilización de 2050 como horizonte temporal común permitió realizar esta segunda comparación. Este año corresponde al último punto para el cual se dispone simultáneamente de información del escenario de referencia y de las tres trayectorias de cero emisiones netas. En 2050, el escenario con meta en ese mismo año alcanza el final de su trayectoria disponible, mientras que los escenarios con metas en 2055 y 2060 todavía se encuentran en etapas intermedias. Por lo tanto, los valores de estos dos últimos escenarios en 2050 no representan el cumplimiento de sus respectivas metas, sino el estado proyectado de sus trayectorias en un momento común.

Los resultados obtenidos bajo esta comparación muestran que, para varias categorías, las diferencias entre las tres trayectorias de mitigación son considerablemente menores que las que podrían sugerirse al observar únicamente sus respectivos años meta. Este comportamiento es particularmente evidente en categorías como *forest (unmanaged)*, *shrubs* y *pasture (grazed)*, que en 2050 presentan diferencias muy próximas entre los tres escenarios respecto a la referencia. Esto muestra que parte de la separación observada al comparar 2050, 2055 y 2060 se encuentra asociada con el momento temporal en el que se realiza la evaluación y no únicamente con las diferencias entre las trayectorias.

Sin embargo, la proximidad entre algunos de los resultados en 2050 no implica que las tres trayectorias sean equivalentes. Categorías como *biomass* y *crops* mantienen una diferenciación entre los escenarios aun cuando se comparan bajo el mismo horizonte temporal. En el caso de *biomass*, la diferencia respecto al escenario de

referencia es mayor en la trayectoria de cero emisiones netas al 2050 y disminuye en las trayectorias con metas posteriores. *Crops* también presenta diferencias entre los tres escenarios en el horizonte común. Esto evidencia que la respuesta temporal no es uniforme entre las categorías y que algunas presentan una mayor diferenciación entre las trayectorias incluso antes de alcanzar sus respectivos años meta.

En este sentido, el análisis en 2050 no sustituye la comparación realizada en los años meta, sino que la complementa. La comparación en los años objetivo permite caracterizar el estado del sistema cuando cada escenario alcanza las cero emisiones netas, mientras que el horizonte común permite controlar el momento de observación para examinar las diferencias existentes entre las trayectorias. Considerar ambas perspectivas permite evitar que las modificaciones asociadas con el transcurso del tiempo sean interpretadas automáticamente como diferencias derivadas de la configuración de los escenarios.

No obstante, el análisis presenta una restricción derivada de la extensión temporal de las simulaciones disponibles. La trayectoria correspondiente al escenario de cero emisiones netas al 2050 finaliza en dicho año, por lo que no se dispone de sus valores proyectados para 2055 y 2060. En consecuencia, aunque en 2055 pueden compararse las trayectorias con metas en 2055 y 2060, no es posible incorporar al escenario con meta en 2050; de manera similar, no se dispone de las tres trayectorias para realizar una comparación conjunta en 2060. Esta característica del diseño experimental limita la posibilidad de determinar cómo evolucionarían las diferencias entre los tres escenarios después del horizonte común seleccionado. En el planteamiento preliminar de la discusión ya se había identificado esta restricción asociada con la extensión de las trayectorias.

Para ampliar esta comparación sería necesario disponer de las tres trayectorias proyectadas sobre un mismo horizonte temporal, de manera que pudieran contrastarse simultáneamente en 2050, 2055 y 2060. Esto permitiría analizar si las diferencias observadas entre los escenarios se mantienen, aumentan o disminuyen después de 2050, sin asumir que las diferencias registradas entre sus respectivos años meta son atribuibles exclusivamente al momento establecido para alcanzar las cero emisiones netas.

Esta distinción tiene implicaciones directas para la interpretación de las trayectorias de mitigación. Con la información disponible no es posible concluir que establecer la meta de cero emisiones netas en 2050, 2055 o 2060 produzca, por sí mismo, una determinada magnitud de cambio territorial. Lo que sí puede establecerse es que las trayectorias presentan comportamientos diferenciados y que la magnitud de las diferencias respecto al escenario de referencia depende tanto de la categoría de USV analizada como del momento en el que se realiza la comparación.

Por ello, uno de los principales resultados metodológicos de este análisis consiste en evidenciar la importancia de mantener explícita la dimensión temporal al comparar

escenarios de largo plazo. Las diferencias obtenidas en los años meta son útiles para caracterizar cada trayectoria respecto a su referencia contemporánea, mientras que la comparación en 2050 proporciona una base temporal homogénea para contrastar simultáneamente los tres escenarios. Esta última característica resulta particularmente relevante para las etapas posteriores de la investigación, debido a que permite analizar la relación entre las modificaciones proyectadas del uso del suelo y los objetivos de conservación bajo una misma referencia temporal.

En consecuencia, 2050 se adopta como horizonte común de comparación no porque los años 2055 y 2060 carezcan de relevancia, sino porque constituye el último año para el cual las cuatro trayectorias analizadas pueden evaluarse simultáneamente. La comparación en los años meta conserva su utilidad para describir la evolución y el estado final disponible de cada escenario, mientras que la comparación común en 2050 permite realizar un contraste transversal metodológicamente más homogéneo. La consideración conjunta de ambas aproximaciones evita confundir la evolución temporal del sistema con las diferencias observadas entre las trayectorias de mitigación y proporciona una base más consistente para la posterior evaluación de su relación con la conservación.

5.1.3 Relación entre las modificaciones proyectadas del uso del suelo y los objetivos de conservación

La relación entre las trayectorias de mitigación y los objetivos de conservación constituye un componente central de esta investigación, debido a que las transformaciones asociadas con el uso del suelo pueden generar interacciones entre ambas agendas. En este sentido, el análisis de las modificaciones proyectadas en las categorías de uso del suelo y vegetación (USV) adquiere relevancia no solamente por los cambios de superficie identificados entre los escenarios, sino también por su vinculación con espacios sujetos a mecanismos de conservación, particularmente las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC).

La incorporación de estos mecanismos dentro del análisis responde al marco de conservación establecido en la política climática nacional. La actualización de la NDC de México de 2022 incorpora, dentro de su componente de adaptación, el Eje C denominado “Conservación, restauración y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos”. Entre sus líneas de acción se encuentran alcanzar una tasa cero de deforestación neta al 2030; fortalecer instrumentos de política ambiental e implementar acciones para conservar y restaurar los ecosistemas continentales, incrementar su conectividad ecológica y favorecer su resiliencia; conservar y restaurar ecosistemas marinos, costeros y dulceacuícolas; y promover acciones relacionadas con conservación de suelos. La propia NDC identifica sinergias con mitigación para varias de estas líneas de acción (SEMARNAT & INECC, 2022).

La integración de las ANP y ADVC mediante el procesamiento espacial realizado en QGIS permitió establecer un vínculo territorial entre los mecanismos de conservación y las regiones empleadas por GCAM. A partir de la identificación y cuantificación de las superficies protegidas por estos mecanismos en cada región, y de la posterior homologación de las categorías de uso del suelo y vegetación de INEGI con las categorías utilizadas por GCAM, fue posible incorporar la dimensión de conservación al análisis de las trayectorias de uso del suelo. De esta manera, la evaluación de la relación entre mitigación y conservación no se sustenta únicamente en la dirección de los cambios agregados de superficie, sino también en su vinculación con superficies previamente identificadas como sujetas a mecanismos de conservación. No obstante, esta relación territorial no implica que una mayor superficie de una determinada categoría de vegetación represente automáticamente un resultado favorable para la conservación, por lo que los cambios proyectados deben interpretarse dentro de los alcances de las categorías homologadas y de la información territorial utilizada.

Esta distinción resulta fundamental para interpretar los incrementos relativos observados en categorías como *forest (unmanaged)* y *shrubs*, así como las reducciones de *pasture (grazed)*, *pasture (other)* y *crops*. Como se discutió previamente, estos cambios representan diferencias entre trayectorias modeladas y no transiciones directas entre categorías. Por ello, una disminución de las superficies asociadas con usos agropecuarios no permite afirmar que dichas superficies se hayan convertido directamente en coberturas forestales o arbustivas. De igual manera, una mayor superficie relativa de *forest (unmanaged)* no puede considerarse, por sí misma, evidencia de restauración ecológica o de una mejora del estado de conservación.

No obstante, la dirección de estos cambios sí permite identificar condiciones potencialmente relevantes para analizar la consistencia entre mitigación y conservación. En particular, el mantenimiento o incremento relativo de determinadas coberturas vegetales frente al escenario de referencia puede resultar compatible con objetivos relacionados con la permanencia de ecosistemas, la reducción de la deforestación y el mantenimiento de reservorios de carbono, siempre que las superficies involucradas conserven las características ecológicas necesarias para cumplir dichas funciones. Esta interpretación resulta congruente con la NDC de México, que establece explícitamente vínculos entre conservación y restauración de ecosistemas, conectividad ecológica, resiliencia y mitigación del cambio climático.

Esta relación entre conservación y mitigación también se encuentra ampliamente reconocida en la literatura científica. El IPCC (2022) señala que las medidas de mitigación en el sector de Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU) pueden generar múltiples cobeneficios cuando se implementan adecuadamente, incluyendo beneficios para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Sin embargo, sus efectos son altamente dependientes del contexto y pueden generar también compensaciones o tensiones con la conservación de hábitats, la producción

de alimentos, la disponibilidad de agua y otros servicios ecosistémicos. Por ello, el IPCC enfatiza que las medidas de mitigación basadas en tierra deben diseñarse buscando maximizar sinergias y limitar posibles efectos adversos (IPCC, 2022).

La evidencia empírica disponible sobre áreas protegidas también muestra que los objetivos climáticos y de conservación pueden coincidir territorialmente. Duncanson et al. (2023), a partir de información global obtenida mediante la misión GEDI de la NASA, estimaron que las áreas protegidas contienen una proporción importante del carbono almacenado en la biomasa leñosa terrestre y encontraron mayores existencias de carbono en áreas protegidas en comparación con superficies no protegidas utilizadas como controles. Los autores relacionan una parte de esta diferencia con emisiones evitadas por deforestación y degradación, lo que demuestra que los mecanismos de protección territorial pueden contribuir simultáneamente a la conservación de ecosistemas y al mantenimiento de reservas de carbono.

Este tipo de evidencia resulta pertinente para la presente investigación porque muestra que la conservación de superficies naturales puede contribuir a objetivos climáticos sin que mitigación y conservación deban considerarse agendas independientes. Sin embargo, tampoco implica que toda superficie protegida produzca automáticamente el mismo beneficio climático o ecológico. Las características de los ecosistemas, las presiones existentes, la efectividad de la protección y el manejo del territorio condicionan los resultados alcanzados. Por ello, la existencia de un mecanismo de conservación constituye un elemento relevante para evaluar la consistencia territorial, pero no sustituye la evaluación de la condición ecológica de las superficies protegidas.

De hecho, la literatura muestra que la designación de áreas protegidas no garantiza por sí sola la permanencia de todos sus beneficios ecológicos. Asamoah et al. (2021) señalan que los cambios climáticos y de uso del suelo pueden interactuar y reducir los beneficios proporcionados por las áreas protegidas, lo que refuerza la necesidad de considerar simultáneamente las presiones territoriales y climáticas dentro de la planificación de la conservación. Más recientemente, Buenafe et al. (2025) destacan que la planificación de áreas protegidas bajo condiciones de cambio climático debe considerar aspectos como refugios climáticos, conectividad y cambios futuros en la distribución de las especies, debido a que la superficie protegida por sí sola no garantiza la conservación efectiva de la biodiversidad bajo condiciones climáticas cambiantes.

Estas consideraciones son relevantes para interpretar los resultados obtenidos con las categorías de GCAM. Una trayectoria que presente una mayor superficie relativa de *forest (unmanaged)* o *shrubs* dentro del marco territorial considerado puede ser potencialmente compatible con determinados objetivos de conservación, pero esta compatibilidad no puede establecerse exclusivamente a partir de la superficie. Sería necesario considerar también aspectos como el tipo de ecosistema representado, su estado de conservación, conectividad, composición y las presiones presentes en el

territorio. En consecuencia, el análisis desarrollado en esta investigación debe entenderse como una evaluación de consistencia territorial entre trayectorias de mitigación y objetivos de conservación, y no como una evaluación integral de la efectividad ecológica de las ANP o ADVC.

La misma precaución debe aplicarse a las reducciones observadas en categorías agropecuarias. Una menor superficie relativa de *pasture (grazed)* o *crops* podría disminuir determinadas presiones sobre el territorio, particularmente cuando se relaciona con una menor expansión hacia coberturas naturales. Sin embargo, una reducción agregada de superficie agropecuaria no permite determinar dónde ocurre dicha modificación ni garantiza que las superficies liberadas sean destinadas a conservación o recuperen condiciones ecológicas favorables. Por ello, estos cambios pueden considerarse potencialmente compatibles con objetivos de conservación únicamente cuando se analizan en conjunto con la información territorial disponible.

Esta cautela resulta particularmente importante porque las estrategias de mitigación basadas en tierra pueden producir tanto sinergias como tensiones. El IPCC (2022) señala que sus efectos sobre biodiversidad, funcionamiento ecosistémico, seguridad alimentaria, agua y bienestar humano dependen de las condiciones locales y de las características de implementación. Esto significa que una estrategia climáticamente favorable en términos de reducción de emisiones no necesariamente produce un resultado favorable para todos los componentes de la conservación.

El comportamiento de *biomass* constituye un ejemplo particularmente relevante de esta posible tensión. El incremento de superficies destinadas a producción de biomasa puede formar parte de determinadas trayectorias de mitigación, pero las opciones de mitigación intensivas en tierra pueden competir por espacio con ecosistemas naturales, producción alimentaria y áreas de importancia para la biodiversidad. Estudios recientes que analizan escenarios integrados muestran que la expansión a gran escala de opciones terrestres de remoción de carbono, incluyendo forestación y bioenergía, puede generar superposición con áreas de elevada importancia para la biodiversidad si la conservación no se incorpora explícitamente en la planificación territorial. Por lo tanto, una diferencia positiva en *biomass* no puede clasificarse automáticamente como una sinergia desde la perspectiva de conservación.

Esta observación refuerza uno de los planteamientos centrales de la investigación: la mitigación del cambio climático y la conservación ambiental comparten un recurso territorial limitado. La implementación de estrategias que modifican la demanda de suelo puede favorecer determinados objetivos de conservación, entrar en competencia con ellos o producir simultáneamente ambos tipos de interacción dependiendo de su localización y características. La literatura sobre planificación espacial ha mostrado precisamente que las áreas prioritarias para biodiversidad, almacenamiento de carbono y otros servicios ecosistémicos pueden coincidir

parcialmente, pero que maximizar un único objetivo no necesariamente maximiza los demás.

Desde esta perspectiva, el concepto de consistencia utilizado en esta investigación no implica que mitigación y conservación deban producir exactamente la misma configuración territorial ni que todo cambio favorable para una de las agendas sea necesariamente favorable para la otra. La consistencia se refiere a la medida en que las modificaciones territoriales asociadas con las trayectorias de mitigación resultan compatibles con el mantenimiento de las superficies y condiciones vinculadas con los objetivos de conservación considerados. Una potencial sinergia puede identificarse cuando ambas agendas presentan direcciones compatibles sobre una determinada superficie o cobertura, mientras que una potencial tensión puede presentarse cuando las demandas territoriales asociadas con una estrategia de mitigación entran en competencia con superficies relevantes para conservación.

Bajo este planteamiento, las ANP y ADVC adquieren especial importancia como mecanismos que permiten vincular territorialmente ambas agendas. Su incorporación al análisis proporciona una referencia espacial para evaluar si las modificaciones proyectadas en las categorías de USV coinciden con superficies sujetas a objetivos de conservación. Sin embargo, esta aproximación no implica que la designación de ANP o ADVC sea la causa de los cambios obtenidos en los escenarios, ni que dichos cambios puedan atribuirse individualmente a un instrumento de conservación determinado.

Asimismo, este análisis debe distinguirse de la meta global de conservación del 30 % de las superficies terrestres y marinas para 2030. Aunque dicha meta forma parte del contexto internacional contemporáneo de conservación, no constituyó un supuesto de los escenarios de GCAM analizados en esta investigación. Por esta razón, las modificaciones proyectadas de USV no deben interpretarse como resultado del cumplimiento de la meta 30×30 ni utilizarse para cuantificar una contribución directa hacia ella. El vínculo con conservación se establece, en cambio, a partir de los mecanismos y objetivos efectivamente considerados en el análisis territorial, particularmente las ANP y ADVC y su relación con las acciones de conservación contempladas en la política climática nacional.

En conjunto, los resultados permiten identificar una relación potencial entre las transformaciones territoriales asociadas con las trayectorias de mitigación y los objetivos de conservación. La presencia de mayores superficies relativas de determinadas categorías de vegetación y menores superficies de algunos usos agropecuarios puede generar condiciones compatibles con ciertos objetivos de conservación, mientras que categorías asociadas con una mayor demanda territorial para mitigación pueden introducir posibles tensiones. Sin embargo, la dirección y magnitud de los cambios de superficie no son suficientes para determinar por sí mismas la existencia de una sinergia o una tensión.

Por ello, el principal aporte del análisis no consiste en demostrar que las estrategias de mitigación generan automáticamente beneficios para la conservación, sino en identificar dónde pueden existir condiciones de compatibilidad o de posible conflicto entre ambas agendas dentro de las superficies consideradas por los mecanismos de conservación. Esta aproximación permite evaluar la consistencia entre mitigación y conservación dentro del alcance de los datos disponibles, manteniendo la distinción entre coincidencia territorial, compatibilidad potencial y causalidad.

5.2 Limitaciones del estudio

Los resultados obtenidos permiten analizar las modificaciones proyectadas en las categorías de uso del suelo y vegetación bajo diferentes trayectorias de mitigación y aproximarse a su relación con los objetivos de conservación considerados en esta investigación. No obstante, su interpretación se encuentra condicionada por las características de los escenarios utilizados, la representación del uso del suelo en GCAM, la disponibilidad temporal de las simulaciones y el nivel de agregación derivado de la integración de distintas fuentes de información territorial. Estas condiciones no invalidan los resultados obtenidos, pero delimitan el alcance de las inferencias que pueden realizarse a partir de ellos.

Una primera limitación se relaciona con la naturaleza prospectiva de los escenarios analizados. Las trayectorias generadas mediante GCAM representan posibles evoluciones del sistema bajo un conjunto determinado de supuestos y condiciones, por lo que no deben interpretarse como predicciones determinísticas de la configuración futura del territorio. En los escenarios de mitigación analizados se incorporaron de manera conjunta diferentes condiciones, entre ellas el establecimiento de una tasa de cero deforestación neta a partir de 2030, modificaciones relacionadas con el consumo de proteínas animales y reducciones del desperdicio alimentario.En consecuencia, las modificaciones proyectadas en las categorías de USV representan la respuesta del sistema ante la configuración integral de cada escenario y podrían presentar comportamientos diferentes bajo otros conjuntos de supuestos.

Esta característica conduce a una segunda limitación relacionada con la atribución de los cambios observados a medidas o supuestos específicos. Los resultados permiten identificar diferencias entre las superficies proyectadas bajo las trayectorias de cero emisiones netas y el escenario de referencia; sin embargo, no permiten determinar qué proporción de dichas diferencias corresponde individualmente a cada uno de los componentes incorporados en los escenarios. Por ejemplo, una mayor superficie relativa de *forest (unmanaged)* no puede atribuirse exclusivamente al supuesto de cero deforestación neta, de la misma manera que una reducción de *pasture (grazed)* no puede atribuirse exclusivamente a las modificaciones relacionadas con el consumo de proteínas animales.

Para realizar este tipo de atribución sería necesario construir escenarios contrafactuales diseñados específicamente para aislar el efecto de las condiciones de interés, manteniendo constantes los demás componentes del escenario. Por ejemplo, la comparación entre dos trayectorias equivalentes en sus demás supuestos, pero diferenciadas por la incorporación o ausencia de la condición de cero deforestación neta, permitiría aproximarse a la contribución específica de dicha medida sobre las categorías forestales. Un procedimiento equivalente podría aplicarse a las modificaciones del consumo de proteínas animales o a la reducción del desperdicio alimentario. La ausencia de estos contrafactuales no impide comparar las trayectorias analizadas ni evaluar su relación con los objetivos de conservación, pero sí limita la posibilidad de realizar afirmaciones causales sobre la contribución individual de cada supuesto a los cambios proyectados.

Una tercera limitación corresponde a la representación de las transiciones entre categorías de uso del suelo. Los resultados utilizados proporcionan información sobre las superficies correspondientes a las diferentes categorías en cada periodo, pero no permiten identificar directamente el origen y destino de cada modificación territorial. De acuerdo con la información técnica del ejercicio, GCAM modela las cantidades de los distintos usos del suelo en cada periodo sin proporcionar directamente, mediante estas salidas, la distribución específica de las conversiones entre categorías.

Por esta razón, la ocurrencia simultánea de una disminución de *pasture (grazed)* y un incremento de *forest (unmanaged)* o *shrubs* no permite concluir que la superficie correspondiente a la primera categoría haya sido transformada directamente en alguna de las segundas. De manera similar, las diferencias positivas o negativas respecto al escenario de referencia deben interpretarse como diferencias de superficie entre las trayectorias y no como evidencia directa de procesos específicos de conversión territorial. La identificación de dichas transiciones requeriría información adicional que permitiera reconstruir los flujos entre las distintas categorías de USV.

La cuarta limitación está relacionada con la comparabilidad temporal de las trayectorias de mitigación. Los escenarios de cero emisiones netas presentan horizontes temporales diferentes, correspondientes a 2050, 2055 y 2060. Por esta razón, la comparación de cada escenario con la referencia en su respectivo año meta incorpora tanto las diferencias asociadas con la trayectoria analizada como la evolución temporal del sistema. Además, la trayectoria correspondiente al escenario de cero emisiones netas al 2050 finaliza en dicho año, por lo que no se dispone de información que permita compararla simultáneamente con las otras dos trayectorias en 2055 y 2060. Esta restricción asociada con la extensión temporal de las simulaciones ya había sido identificada en el planteamiento preliminar del análisis.

La selección de 2050 como horizonte común permitió reducir esta dificultad, al constituir el último punto temporal para el cual se dispone simultáneamente de información del escenario de referencia y de las tres trayectorias de mitigación. Sin

embargo, esta comparación no permite determinar cómo evolucionarían posteriormente las diferencias entre los tres escenarios. Para ampliar este análisis sería necesario disponer de las tres trayectorias proyectadas sobre un mismo horizonte temporal, de manera que pudieran compararse simultáneamente en 2050, 2055 y 2060.

Esta limitación debe distinguirse de la ausencia de escenarios contrafactuales. La extensión desigual de las trayectorias constituye un problema de comparabilidad temporal, mientras que la ausencia de contrafactuales constituye un problema de atribución causal. La primera podría abordarse prolongando las trayectorias sobre un horizonte temporal común; la segunda requeriría diseñar escenarios que permitieran aislar los efectos de condiciones específicas. Esta distinción resulta relevante para evitar atribuir las diferencias observadas entre los respectivos años meta exclusivamente al momento establecido para alcanzar las cero emisiones netas.

Una quinta limitación se relaciona con el proceso de homologación de las categorías de uso del suelo y vegetación utilizadas en las diferentes fuentes de información. Para incorporar la dimensión de conservación al análisis, se realizó previamente un procesamiento espacial en QGIS mediante el cual se identificó y cuantificó la superficie protegida por Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) correspondiente a las regiones empleadas por GCAM. Posteriormente, la información de uso del suelo y vegetación de INEGI asociada con estas superficies fue homologada con las categorías utilizadas por GCAM, permitiendo integrar la información territorial de conservación con la clasificación empleada en el modelo.

Este procedimiento permitió establecer un vínculo territorial explícito entre las superficies sujetas a mecanismos de conservación, las regiones de GCAM y las categorías de USV consideradas en el análisis. Sin embargo, la homologación implica necesariamente una simplificación de la clasificación original de INEGI, debido a que ambas fuentes presentan categorías, niveles de detalle y propósitos diferentes. En consecuencia, una categoría de GCAM puede integrar coberturas que en la clasificación de INEGI se encuentran diferenciadas y que pueden presentar características ecológicas distintas.

Por ello, las modificaciones proyectadas para una categoría homologada no permiten inferir por sí mismas cambios equivalentes en la composición, estructura o condición ecológica de la vegetación. La homologación permite hacer compatibles las fuentes de información para desarrollar el análisis a la escala requerida, pero supone una pérdida de detalle respecto a la clasificación original de USV. Esta consideración resulta particularmente importante para interpretar categorías agregadas como *forest (unmanaged)*, *shrubs*, *grass* o *pasture*, cuyo comportamiento debe analizarse de acuerdo con las definiciones y el nivel de agregación utilizados por GCAM.

Una sexta limitación es la que corresponde al alcance espacial y ecológico de la evaluación de conservación. El procesamiento realizado en QGIS permitió determinar las superficies protegidas mediante ANP y ADVC correspondientes a las distintas regiones de GCAM y relacionarlas posteriormente con las categorías homologadas de USV. En este sentido, la vinculación entre mitigación y conservación no se deriva únicamente de una interpretación posterior de las superficies proyectadas, sino que parte de una delimitación espacial previa de las superficies sujetas a estos mecanismos de conservación.

No obstante, esta integración no permite determinar con el mismo nivel de detalle la respuesta particular de cada ANP o ADVC frente a las trayectorias de mitigación. Los resultados se encuentran agregados conforme a las regiones y categorías utilizadas en el análisis, por lo que no deben interpretarse como proyecciones específicas del comportamiento futuro de cada polígono individual de conservación. En consecuencia, los resultados permiten aproximarse a patrones territoriales generales de compatibilidad o posible tensión, pero no evaluar de manera individual la evolución de cada ANP o ADVC.

Asimismo, la presencia o modificación de una determinada categoría de USV dentro del marco territorial analizado no proporciona por sí misma información sobre su estado ecológico. Aspectos como la composición de especies, estructura de la vegetación, fragmentación, conectividad, integridad ecológica, calidad del hábitat, grado de degradación o efectividad del manejo de las áreas de conservación no se encuentran representados directamente mediante las superficies proyectadas. Por esta razón, una mayor superficie relativa de *forest (unmanaged)*, por ejemplo, no puede interpretarse automáticamente como una mejora equivalente en la conservación de la biodiversidad. De manera similar, una reducción de las categorías agropecuarias no demuestra que la superficie correspondiente haya sido restaurada o haya adquirido mejores condiciones ecológicas.

Esta consideración delimita también el alcance del concepto de consistencia utilizado en la investigación. La metodología permite identificar si las modificaciones territoriales asociadas con las trayectorias de mitigación presentan condiciones potencialmente compatibles o en posible tensión con los objetivos y mecanismos de conservación considerados. Sin embargo, no constituye una evaluación integral de la efectividad ecológica de las ANP y ADVC ni permite determinar únicamente a partir de la superficie si una trayectoria representa una mejora o deterioro de la conservación.

En consecuencia, la consistencia evaluada en este trabajo debe interpretarse principalmente en su dimensión territorial, a partir de la relación entre las modificaciones proyectadas de USV y las superficies vinculadas con los mecanismos de conservación analizados. La identificación de una potencial sinergia requiere, por tanto, cautela: una dirección compatible entre una trayectoria de mitigación y el mantenimiento de determinadas coberturas puede constituir una condición favorable

para determinados objetivos de conservación, pero no demuestra por sí misma la existencia de un beneficio ecológico. De manera equivalente, una posible tensión territorial señala una incompatibilidad potencial que requeriría análisis adicionales para determinar sus consecuencias ecológicas específicas.

Finalmente, la meta global de conservación del 30 % de las superficies terrestres y marinas para 2030 no constituyó un supuesto incorporado en los escenarios de GCAM analizados. En consecuencia, las modificaciones proyectadas en las categorías de USV no pueden atribuirse al cumplimiento de dicha meta ni utilizarse directamente para cuantificar su avance. Aunque la meta 30×30 puede formar parte del contexto más amplio de la política de conservación, la relación entre mitigación y conservación evaluada en esta investigación se sustenta en los objetivos identificados en el marco analizado y en su vinculación territorial con mecanismos como las ANP y ADVC.

En conjunto, estas limitaciones delimitan el alcance de las conclusiones sin impedir responder al objetivo central de la investigación. Los resultados permiten comparar las configuraciones de USV asociadas con distintas trayectorias de mitigación, identificar las categorías en las que se concentran las principales diferencias y evaluar su relación territorial con mecanismos de conservación. Sin embargo, no permiten atribuir causalmente cada modificación a una medida específica, reconstruir directamente las transiciones entre categorías, evaluar con detalle la evolución individual de cada ANP o ADVC ni determinar integralmente la condición ecológica de las superficies involucradas.

Estas limitaciones permiten, a su vez, identificar líneas para profundizar el análisis en investigaciones posteriores. La construcción de escenarios contrafactuales permitiría aislar la contribución de condiciones específicas de mitigación; la prolongación de todas las trayectorias hasta un horizonte temporal común fortalecería su comparación; y la incorporación de información espacial y ecológica de mayor resolución permitiría complementar la evaluación territorial con indicadores de integridad, conectividad, condición de los ecosistemas y efectividad de los mecanismos de conservación. De esta manera, sería posible avanzar hacia una caracterización más detallada de las sinergias y tensiones entre las estrategias de mitigación del cambio climático y los objetivos de conservación ambiental.

5.3 Conclusiones

La presente investigación permitió evaluar cualitativamente el grado de consistencia entre las estrategias de mitigación del cambio climático y los objetivos de conservación ambiental en México en un horizonte de largo plazo, mediante la integración de escenarios de uso del suelo simulados con el modelo Global Change Analysis Model (GCAM) e información geoespacial sobre uso del suelo, vegetación y superficies sujetas a mecanismos de conservación en el país. Los resultados muestran que esta consistencia no es uniforme, sino que varía entre categorías de

uso del suelo, escenarios de mitigación y horizontes temporales. De esta manera, el análisis permitió identificar condiciones de convergencia y posibles divergencias territoriales entre ambas agendas, dentro de los alcances y la resolución del modelo empleado.

En relación con el primer objetivo específico, se identificaron las estrategias de mitigación con incidencia en el uso del suelo consideradas en los escenarios analizados. Entre sus principales condiciones se encuentran la correcta implementación de la meta de cero deforestación neta, las modificaciones relacionadas con el consumo de proteínas animales y la reducción del desperdicio alimentario. Su incorporación conjunta en las trayectorias de cero emisiones netas para los tres años analizados dio lugar a diferencias en la superficie asignada a distintas categorías de uso del suelo respecto al escenario de referencia. Estos resultados muestran la importancia de incorporar explícitamente la dimensión territorial al analizar estrategias climáticas de largo plazo, particularmente aquellas cuya implementación puede modificar la demanda de suelo.

Respecto al segundo objetivo específico, la caracterización de los objetivos de conservación ambiental y de los mecanismos territoriales considerados para su análisis permitió construir una referencia espacial para relacionarlos con las trayectorias de uso del suelo de GCAM. Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) se emplearon como aproximaciones territoriales para representar espacialmente la conservación dentro del análisis. El procesamiento realizado en el software QGIS permitió identificar y cuantificar las superficies correspondientes a estos mecanismos dentro de las regiones empleadas por el modelo. A su vez, la homologación entre las categorías de uso del suelo y vegetación del INEGI y las categorías utilizadas por GCAM permitió vincular información generada a escalas y clasificaciones diferentes. Esta integración constituye uno de los principales aportes metodológicos del trabajo, al establecer una referencia común para analizar conjuntamente mitigación y conservación.

En relación con el tercer objetivo específico, se identificaron condiciones diferenciadas de compatibilidad y posible tensión entre las trayectorias de mitigación y los objetivos de conservación. Dentro de los alcances de esta investigación, las posibles sinergias y tensiones se interpretaron a partir de condiciones de convergencia o divergencia territorial, sin asumir que estas representan directamente beneficios o impactos ecológicos. Las principales diferencias respecto al escenario de referencia se concentraron en categorías como forest (unmanaged), shrubs, pasture (grazed), pasture (other)y crops. Los incrementos relativos de algunas categorías asociadas con vegetación y las reducciones de determinados usos agropecuarios muestran condiciones potencialmente compatibles con ciertos objetivos de conservación. Sin embargo, estas modificaciones no constituyen por sí mismas evidencia de recuperación ecológica, restauración de ecosistemas o disminución efectiva de las presiones sobre las superficies protegidas.

Por otra parte, el comportamiento de categorías asociadas con una mayor demanda territorial para mitigación, particularmente biomass, permite reconocer posibles tensiones derivadas de la competencia por el uso del suelo. En este sentido, las trayectorias analizadas muestran que las estrategias de mitigación pueden presentar condiciones de convergencia con determinados objetivos de conservación y,

simultáneamente, generar posibles divergencias relacionadas con las necesidades territoriales de otros usos. Estas relaciones dependen de las características de las categorías involucradas y del contexto territorial considerado, por lo que no es posible establecer una correspondencia automática entre la dirección de las diferencias entre superficies y sus implicaciones para la conservación ambiental.

Esta distinción resulta fundamental para interpretar los resultados. Las categorías de GCAM representan superficies agregadas y no permiten determinar directamente características como la composición de especies, la integridad ecológica, la conectividad, la calidad del hábitat o el estado de degradación. Asimismo, las modificaciones simultáneas de las categorías no representan necesariamente conversiones directas entre ellas. Por ejemplo, una disminución de pasture (grazed) no demuestra que esa superficie se haya convertido directamente en forest (unmanaged) o shrubs. De igual manera, la información territorial de ANP y ADVC permite contextualizar las diferencias proyectadas, pero no localizar directamente los cambios futuros dentro de cada superficie protegida. Por ello, las interacciones identificadas deben entenderse principalmente en términos de consistencia territorial potencial y no como una evaluación directa del estado ecológico de las superficies analizadas.

En cuanto al cuarto objetivo específico, se determinó que la evaluación de las posibles interacciones entre mitigación y conservación depende también del horizonte temporal utilizado para realizar la comparación. La evaluación de cada trayectoria en su respectivo año meta permitió caracterizar las diferencias respecto al escenario de referencia en 2050, 2055 y 2060. Sin embargo, la comparación directa entre estos años incorpora simultáneamente las diferencias entre las trayectorias y la evolución temporal del sistema. Por esta razón, el año 2050 se utilizó como horizonte común para realizar la comparación transversal entre los tres escenarios de mitigación y el escenario de referencia, manteniendo las evaluaciones en los respectivos años meta como análisis complementarios.

Bajo este horizonte común, varias de las categorías con mayores diferencias respecto al escenario de referencia presentaron comportamientos relativamente próximos entre las tres trayectorias, particularmente forest (unmanaged), shrubs y pasture (grazed), mientras que otras, como biomass y crops, mostraron una mayor diferenciación entre escenarios. Estos resultados permitieron reconocer patrones compartidos y diferencias en las superficies proyectadas bajo las distintas trayectorias de mitigación, sin confundirlas con aquellas derivadas de comparar horizontes temporales distintos. En consecuencia, la evaluación de la consistencia entre mitigación y conservación requiere considerar explícitamente la dimensión temporal, especialmente cuando se analizan estrategias con diferentes años meta.

En conjunto, los resultados permiten concluir que el grado de consistencia entre las estrategias de mitigación simuladas y los objetivos de conservación ambiental es diferenciado y depende de las características de las categorías de uso del suelo, de las condiciones establecidas en los escenarios y del horizonte temporal considerado. La integración de las diferencias de superficie proyectadas con la información geoespacial de conservación permitió identificar condiciones de convergencia y posibles divergencias territoriales, proporcionando elementos para examinar la compatibilidad potencial entre ambas agendas. No obstante, estas relaciones no

deben interpretarse como efectos causales de medidas individuales ni como evidencia directa de beneficios o impactos ecológicos sobre los mecanismos de conservación analizados.

Una limitación importante de la investigación corresponde a la imposibilidad de atribuir las diferencias de superficie proyectadas a estrategias de mitigación individuales. Los escenarios de cero emisiones netas incorporan simultáneamente distintas condiciones y supuestos, por lo que las diferencias respecto al escenario de referencia reflejan la respuesta conjunta del sistema modelado. Aunque este escenario proporciona una base para cuantificar las diferencias entre trayectorias, no constituye un contrafactual específico para cada una de las estrategias incorporadas. En consecuencia, no es posible determinar qué proporción de las modificaciones proyectadas corresponde exclusivamente al establecimiento de cero deforestación neta, a los cambios relacionados con el consumo de proteínas animales o a la reducción del desperdicio alimentario.

Para superar esta limitación, futuras investigaciones y actualizaciones de las NDC deberían considerar la construcción de escenarios contrafactuales específicos para cada trayectoria de mitigación, en los que sea posible modificar de manera controlada las condiciones o estrategias individuales, manteniendo constantes los demás supuestos relevantes. Esto permitiría distinguir la contribución de cada medida a las modificaciones proyectadas del uso del suelo y fortalecer la interpretación de sus posibles convergencias y divergencias con los objetivos de conservación. Asimismo, la incorporación de información espacial y ecológica de mayor resolución permitiría profundizar en la evaluación de las condiciones de conservación de las superficies involucradas y avanzar hacia una caracterización más detallada de las posibles sinergias y tensiones entre ambas agendas.

Por lo anterior, la principal contribución de esta investigación consiste en demostrar la utilidad de integrar la modelación de escenarios de largo plazo con información geoespacial de conservación para evaluar cualitativamente la consistencia territorial entre estrategias climáticas y objetivos ambientales. Esta aproximación permite ampliar el análisis de las estrategias de mitigación más allá de su contribución a la reducción de emisiones, al incorporar las modificaciones proyectadas del uso del suelo y su relación con los mecanismos de conservación considerados. De esta manera, el trabajo proporciona una base metodológica para identificar condiciones potenciales de convergencia y divergencia entre mitigación y conservación, así como para orientar el desarrollo de evaluaciones posteriores que permitan establecer con mayor precisión las contribuciones individuales de las estrategias de mitigación y sus posibles implicaciones territoriales.

5.3.1 Aporte para la NDC y la planeación climática

La metodología desarrollada presenta una aplicación relevante para el análisis de las estrategias climáticas nacionales. La información geoespacial generada durante la investigación fue proporcionada como insumo técnico al Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) de la UNAM en el marco del proceso de actualización de la NDC 3.0 de México, aunque los productos derivados de este trabajo no fueron incorporados en la versión final de la NDC. Esta participación permitió vincular el ejercicio académico con un proceso de planeación climática nacional y constituye un

antecedente para incorporar de manera más explícita la dimensión territorial y de conservación en ejercicios posteriores de evaluación de estrategias de mitigación.

En este sentido, el aporte del trabajo a la NDC no radica en establecer qué medidas deberían adoptarse ni en atribuir efectos territoriales específicos a políticas individuales, sino en proporcionar una aproximación analítica para examinar las posibles implicaciones territoriales de las trayectorias de mitigación antes de su implementación. La integración de escenarios de largo plazo con información sobre ANP, ADVC, ecorregiones y usos del suelo permite identificar categorías y contextos territoriales en los que las transformaciones asociadas con las trayectorias climáticas podrían presentar condiciones de convergencia o posibles divergencias con los objetivos de conservación. Este tipo de análisis puede complementar las evaluaciones centradas en emisiones al incorporar una dimensión territorial que permita considerar conjuntamente mitigación y conservación.

No obstante, para fortalecer su aplicación en futuros procesos de actualización de la NDC, resulta necesario complementar este enfoque con escenarios contrafactuales específicos para cada trayectoria de mitigación. La construcción de estos escenarios permitiría distinguir los efectos de las estrategias individuales sobre las categorías de uso del suelo, evitando atribuir a una sola medida las diferencias que resultan de la combinación de múltiples supuestos. De esta manera, sería posible establecer una relación más precisa entre las estrategias consideradas en la planeación climática, las modificaciones territoriales proyectadas y sus posibles implicaciones para los objetivos de conservación ambiental.

En consecuencia, la principal contribución de esta investigación para la planeación climática consiste en proporcionar una base metodológica que permite integrar la dimensión territorial y de conservación en el análisis prospectivo de las estrategias de mitigación. Aunque los resultados no permiten establecer relaciones causales individuales entre las medidas consideradas y las modificaciones del uso del suelo, sí permiten caracterizar las diferencias entre trayectorias, reconocer condiciones potenciales de convergencia y divergencia territorial e identificar los requerimientos metodológicos para profundizar en su evaluación. En el contexto de futuros procesos de actualización de la NDC y de la planeación climática de largo plazo, esta aproximación puede contribuir a fortalecer la consideración conjunta de los objetivos climáticos y de conservación ambiental en México.

Bibliografía

1. Asamoah, E. F., Beaumont, L. J., & Maina, J. M. (2021). Climate and land-use changes reduce the benefits of terrestrial protected areas. Nature Climate Change, 11, 1105–1110. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01223-2
2. Buenafe, K. C. V., Dunn, D. C., Metaxas, A., Schoeman, D. S., Everett, J. D., Pidd, A., Hanson, J. O., Bentley, L. K., Kim, S. W., Neubert, S., Scales, K. L., Dabalà, A., Brito-Morales, I., et al. (2025). Current approaches and future opportunities for climate-smart protected areas. Nature Reviews Biodiversity, 1, 284–297. https://doi.org/10.1038/s44358-025-00041-0
3. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2026). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 19 de enero de 2026). https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf
4. Calvin, K., Patel, P., Clarke, L., Asrar, G., Bond-Lamberty, B., Cui, R. Y., Di Vittorio, A., Dorheim, K., Edmonds, J., Hartin, C., Hejazi, M., Horowitz, R., Iyer, G., Kyle, P., Kim, S., Link, R., McJeon, H., Smith, S. J., Snyder, A., … Wise, M. (2019). GCAM v5.1: Representing the linkages between energy, water, land, climate, and economic systems. Geoscientific Model Development, 12, 677–698. https://doi.org/10.5194/gmd-12-677-2019
5. Climate Action Tracker. (s. f.). Mexico. https://climateactiontracker.org/countries/mexico/
6. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (s. f.). Texto del Acuerdo Regional. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://www.cepal.org/es/acuerdodeescazu
7. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017, 31 de diciembre). Política nacional de cambio climático: Marco regulatorio. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/politica-nacional-de-cambio-climatico-marco-regulatorio
8. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2016, 1 de enero). Sistema de Información Geográfica de las Áreas Naturales Protegidas (SIG). Gobierno de México. https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/sistema-de-informacion-geografica-de-las-areas-naturales-protegidas
9. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2018). 100 años de conservación en México: Áreas Naturales Protegidas de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.conanp.gob.mx/pdf/100A%C3%B1osConservaci%C3%B3n.pdf
10. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2025a). Numeralia de Áreas Naturales Protegidas. Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación. https://simec.conanp.gob.mx/numeralia.php
11. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2025b, 28 de noviembre). SIG: tecnología que conserva. Gobierno de México. https://www.gob.mx/conanp/articulos/sig-tecnologia-que-conserva?idiom=es
12. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (s. f.-a). ¿Qué hacemos? Gobierno de México. https://www.gob.mx/conanp/que-hacemos
13. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (s. f.-b). Sistema de Información Geográfica. Recuperado el 28 de septiembre de 2026, de https://sig.conanp.gob.mx/
14. Comisión Nacional Forestal. (2001). Programa Estratégico Forestal para México 2025. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/4/307Programa%20Estrat%C3%A9gico%20Forestal%202025.pdf
15. Comisión Nacional Forestal. (2012). Elementos para el diseño de la Estrategia Nacional para REDD+. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195043/Elementos_para_el_diseno_de_la_Estrategia_Nacional_para_REDD_Octubre_2012.pdf
16. Comisión Nacional Forestal. (2022, 30 de diciembre). Se reduce en 26% la tasa anual de deforestación. Gobierno de México. https://www.gob.mx/conafor/prensa/se-reduce-en-26-la-tasa-anual-de-deforestacion
17. Comisión Nacional Forestal. (2023, 2 de mayo). ¿Cuánto carbono secuestran los ecosistemas forestales? Gobierno de México. https://www.gob.mx/conafor/articulos/cuanto-carbono-secuestran-los-ecosistemas-forestales
18. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (1992). Acuerdo por el que se crea la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/web/conocenos/acuerdo_presidencial.html
19. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2023). Áreas protegidas. Biodiversidad Mexicana. https://www.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot
20. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2024, 24 de septiembre). Convenio sobre la Diversidad Biológica. Biodiversidad Mexicana. https://www.biodiversidad.gob.mx/planeta/internacional/cbd
21. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2025). Programa Nacional de Restauración Ambiental 2025-2030. Biodiversidad Mexicana. https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/programanacionalderestauracion
22. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (s. f.-a). Áreas protegidas en el mundo. http://www2.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot/enelmundo.html
23. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (s.f.-b). Ecosistemas de México: Pastizales. https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/pastizales
24. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (s. f.-c). México en la implementación del Marco Mundial de Biodiversidad Kunming-Montreal. Biodiversidad Mexicana. Recuperado el 27 de septiembre de 2026, de https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/estrategias-sobre-biodiversidad/enbiomex-2022
25. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (s. f.-d). Selvas húmedas. Biodiversidad Mexicana. https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/selvaHumeda
26. Conferencia de las Partes. (2002). Decisión 11/CP.7: Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. En Informe de la Conferencia de las Partes sobre su séptimo período de sesiones, celebrado en Marrakech del 29 de octubre al 10 de noviembre de 2001. Adición: Segunda parte, medidas adoptadas por la Conferencia de las Partes (FCCC/CP/2001/13/Add.1, pp. 56–67). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. https://unfccc.int/resource/docs/spanish/cop7/cp713a01s.pdf

27. Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (2001, 8 de noviembre). Proyecto de informe de la Conferencia de las Partes sobre su séptimo período de sesiones, celebrado en Marrakech: Primera parte, deliberaciones. Capítulo I, apertura del período de sesiones (FCCC/CP/2001/L.16). https://unfccc.int/resource/docs/spanish/cop7/cp7l16s.pdf
28. Convention on Biological Diversity. (2022, 27 de diciembre). COP15: Final text of Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework. https://www.cbd.int/article/cop15-final-text-kunming-montreal-gbf-221222
29. Daigneault, A., Baker, J. S., Guo, J., Lauri, P., Favero, A., Forsell, N., Johnston, C., Ohrel, S. B., & Sohngen, B. (2022). How the future of the global forest sink depends on timber demand, forest management, and carbon policies. Global Environmental Change, 76, 102582. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102582
30. Diario Oficial de la Federación. (2018, 13 de julio). Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley General de Cambio Climático. Cámara de Diputados. https://www.diputados.gob.mx/sedia/biblio/prog_leg/Prog_leg_LXIII/293_DOF_13jul18.pdf
31. Di Vittorio, A. V., Chini, L. P., Bond-Lamberty, B., Mao, J., Shi, X., Truesdale, J., Craig, A., Calvin, K., Jones, A., Collins, W. D., Edmonds, J., Hurtt, G. C., Thornton, P., & Thomson, A. (2014). From land use to land cover: Restoring the afforestation signal in a coupled integrated assessment–earth system model and the implications for CMIP5 RCP simulations. Biogeosciences, 11, 6435–6450. https://doi.org/10.5194/bg-11-6435-2014
32. Duncanson, L., Liang, M., Leitold, V., Armston, J., Krishna Moorthy, S. M., Dubayah, R., Costedoat, S., Enquist, B. J., Fatoyinbo, L., Goetz, S. J., Gonzalez-Roglich, M., Merow, C., Roehrdanz, P. R., Tabor, K., & Zvoleff, A. (2023). The effectiveness of global protected areas for climate change mitigation. Nature Communications, 14, 2908. https://doi.org/10.1038/s41467-023-38073-9
33. FAO. (2012). Grassland index: A searchable catalogue of grass and forage legumes. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.sciepub.com/reference/390982
34. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. FAO. https://doi.org/10.4060/ca9825en
35. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). Global Forest Resources Assessment 2025. https://doi.org/10.4060/cd6709en
36. Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., … Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. Earth System Science Data, 15(12), 5301-5369. https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023
37. Greenpeace México. (2021, 1 de octubre). NDC de México deben ser más ambiciosos y progresivos. Greenpeace México. https://www.greenpeace.org/mexico/noticia/49232/ndc-de-mexico-deben-ser-mas-ambiciosos-y-progresivos/

38. Hilaire, J., & Bertram, C. (2020). The REMIND-MAgPIE model and scenarios for transition risk analysis. Potsdam Institute for Climate Impact Research. https://doi.org/10.2312/pik.2020.006
39. Huang, M., Piao, S., Ciais, P., Peñuelas, J., Wang, X., Keenan, T. F., Peng, S., Berry, J. A., Wang, K., Mao, J., Alkama, R., Cescatti, A., Cuntz, M., De Deurwaerder, H., Gao, M., He, Y., Liu, Y., Luo, Y., Myneni, R. B., … Janssens, I. A. (2019). Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. Nature Ecology & Evolution, 3(5), 772-779. https://doi.org/10.1038/s41559-019-0838-x
40. Ibarrola-Rivas, M.-J., Unar-Munguía, M., Kastner, T., & Nonhebel, S. (2022). Does Mexico have the agricultural land resources to feed its population with a healthy and sustainable diet? Sustainable Production and Consumption, 34, 371–384. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.09.015
41. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018, 18 de mayo). Contexto internacional en materia de cambio climático. https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/contexto-internacional-17057
42. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2021). Acuerdos internacionales. México ante el cambio climático. https://cambioclimatico.gob.mx/acuerdos-internacionales/
43. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2024). Informe del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) 1990-2022. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/INEGYCEI_170625_CGMCC.pdf
44. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, Serie VI (continuo nacional) [Conjunto de datos]. Geoportal de CONABIO. https://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s6gw.html
45. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021a). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, Serie VII (continuo nacional) [Conjunto de datos]. Geoportal de CONABIO. http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s7gw.html
46. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021b). Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, Serie VII. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463902836.pdf
47. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, & Instituto Nacional de Ecología. (2008). Ecorregiones terrestres de México [Conjunto de datos geográficos, escala 1:1 000 000]. Geoportal de CONABIO. https://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/ecort08gw.html
48. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2000). Land use, land-use change, and forestry. https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=162
49. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Volumen 4. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html

50. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Agriculture, forestry and other land uses (AFOLU). In P. R. Shukla et al. (Eds.), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926.009
51. International Institute for Applied Systems Analysis. (s. f.). MESSAGEix-GLOBIOM: 2020 documentation. https://docs.messageix.org/projects/global/en/v2020/
52. Joint Global Change Research Institute. (s. f.-b). Outputs from the land model. En GCAM v7 documentation. https://jgcri.github.io/gcam-doc/v7.0/outputs_land.html
53. Kauppi, P. E., Posch, M., & Pirinen, P. (2014). Large Impacts of Climatic Warming on Growth of Boreal Forests since 1960. PLoS ONE, 9(11), e111340. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111340
54. Luo, M., Zhao, X., Hao, D., Bond-Lamberty, B., Daigneault, A., Patel, P. L., Kou-Giesbrecht, S., Reyer, C. P. O., Dashti, H., & Chen, M. (2025). Role of Forest Carbon Change in Shaping Future Land Use and Land Cover Change. Global Change Biology, 31(5), e70219. https://doi.org/10.1111/gcb.70219
55. McDowell, N. G., Allen, C. D., Anderson-Teixeira, K., Aukema, B. H., Bond-Lamberty, B., Chini, L., Clark, J. S., Dietze, M., Grossiord, C., Hanbury-Brown, A., Hurtt, G. C., Jackson, R. B., Johnson, D. J., Kueppers, L., Lichstein, J. W., Ogle, K., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Seidl, R., … Xu, C. (2020). Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. Science, 368(6494), eaaz9463. https://doi.org/10.1126/science.aaz9463
56. México ante el Cambio Climático. (s. f.). Contribución determinada a nivel nacional (2020). https://cambioclimatico.gob.mx/NDC/ndc-2020.html
57. Mo, L., Zohner, C. M., Reich, P. B., Liang, J., de Miguel, S., Nabuurs, G.-J., Renner, S. S., van den Hoogen, J., Araza, A., Herold, M., Mirzagholi, L., Ma, H., Averill, C., Phillips, O. L., Gamarra, J. G. P., Hordijk, I., Routh, D., Abegg, M., Adou Yao, Y. C., … Crowther, T. W. (2023). Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. Nature, 624, 92–101. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z
58. Muller, M. R., & Middleton, J. (1994). A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. Landscape Ecology, 9(2), 151–157. https://doi.org/10.1007/BF00124382
59. Naciones Unidas. (2024). Biodiversidad. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/
60. Naciones Unidas. (s. f.-a). Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Río de Janeiro, Brasil, 3-14 de junio de 1992. https://www.un.org/es/node/143139
61. Naciones Unidas. (s. f.-b). Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, Estocolmo 1972. https://www.un.org/es/conferences/environment/stockholm1972
62. Naciones Unidas. (s. f.-c). Convenio sobre la Diversidad Biológica. https://www.un.org/es/observances/biodiversity-day/convention
63. NASA Science Editorial Team. (2018, 9 de agosto). NASA finds Amazon drought leaves long legacy of damage. NASA. https://science.nasa.gov/earth/climate-change/nasa-finds-amazon-drought-leaves-long-legacy-of-damage/

64. Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. Science, 333(6045), 988-993. https://doi.org/10.1126/science.1201609
65. Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., Houghton, R. A., Fang, J., Kauppi, P. E., Keith, H., Kurz, W. A., Ito, A., Lewis, S. L., Nabuurs, G.-J., Shvidenko, A., Hashimoto, S., Lerink, B., Schepaschenko, D., Castanho, A., & Murdiyarso, D. (2024). The enduring world forest carbon sink. Nature, 631(8021), 563-569. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x
66. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. (s. f.). Welcome to IMAGE 3.3 documentation. https://models.pbl.nl/image/Welcome_to_IMAGE_3.3_Documentation
67. QGIS Development Team. (s. f.-a). Vector general. En QGIS Documentation 3.34. https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectorgeneral.html
68. QGIS Development Team. (s. f.-b). Vector overlay. En QGIS Documentation 3.34. https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectoroverlay.html
69. Riebeek, H. (2011, 16 de junio). The carbon cycle. NASA Earth Observatory. https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/the-carbon-cycle/
70. Roebroek, C. T. J., Caporaso, L., Duveiller, G., Davin, E. L., Seneviratne, S. I., & Cescatti, A. (2025). Potential tree cover under current and future climate scenarios. Scientific Data, 12, 564. https://doi.org/10.1038/s41597-025-04408-y
71. Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., & Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. Nature, 534(7609), 631–639. https://doi.org/10.1038/nature18307
72. Secretaría de Bienestar. (2020, 6 de noviembre). Programa Sembrando Vida. Gobierno de México. https://www.gob.mx/bienestar/acciones-y-programas/programa-sembrando-vida
73. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030. Gobierno de México. https://cambioclimatico.gob.mx/NDC/ndc-2015.html
74. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). Biodiversidad. En Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap4_biodiversidad.pdf
75. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020, 28 de octubre). Carta Mundial de la Naturaleza. https://www.gob.mx/semarnat/articulos/carta-mundial-de-la-naturaleza-255980?idiom=es
76. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2024, 27 de noviembre). México reafirmó su compromiso con la acción climática ambiciosa en la COP29. Gobierno de México. https://www.gob.mx/semarnat/prensa/mexico-reafirmo-su-compromiso-con-la-

accion-climatica-ambiciosa-en-la-cop29?idiom=es-MX&utm_source=chatgpt.com
77. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2025a, 29 de octubre). Hoja de Ruta de México para cumplir o superar la Meta 3 del Marco Mundial de Biodiversidad Kunming-Montreal. Gobierno de México. https://www.gob.mx/semarnat/documentos/hoja-de-ruta-de-mexico-para-cumplir-o-superar-la-meta-3-del-marco-mundial-de-biodiversidad-kunming-montreal-411548
78. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2025b, 24 de noviembre). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional 3.0 de México. Gobierno de México. https://www.gob.mx/semarnat/documentos/actualizacion-de-la-contribucion-determinada-a-nivel-nacional-3-0-de-mexico?idiom=es
79. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, & Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022). Contribución Determinada a Nivel Nacional: Actualización 2022. Gobierno de México. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Mexico_NDC_UNFCCC_update2022_FINAL.pdf
80. Secretaría de Relaciones Exteriores. (s. f.). Protocolo de Kyoto a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Biblioteca Virtual de Tratados Internacionales. https://cja.sre.gob.mx/tratadosmexico/tratados/eyJpdiI6IlZKZU5NQytHXC9PemZCTkFGTmt1QXlnPT0iLCJ2YWx1ZSI6Ikp2Qmt3eFNoM2tVVktlYWhTY1N3dXc9PSIsIm1hYyI6IjdhMTA2MjgwNGMxMTVmNzJmZmVkM2VhZjkyMjc3YTgyZjEyYzhjMWUxMTIxMWZiZmQwMzJhMzFmNmE2ZjU0MDUifQ==
81. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (s. f.). Política nacional de cambio climático. http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/politica_nacional.html
82. Servicio Geológico Mexicano. (2017, 22 de marzo). Sistemas de información geográfica. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html
83. Shi, H., Tian, H., Pan, N., Reyer, C. P. O., Ciais, P., Chang, J., Forrest, M., Frieler, K., Fu, B., Gädeke, A., Hickler, T., Ito, A., Ostberg, S., Pan, S., Stevanović, M., & Yang, J. (2021). Saturation of Global Terrestrial Carbon Sink Under a High Warming Scenario. Global Biogeochemical Cycles, 35(10), e2020GB006800. https://doi.org/10.1029/2020GB006800
84. Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., de Vries, W., Vermeulen, S. J., Herrero, M., Carlson, K. M., Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L. J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., Godfray, H. C. J., Tilman, D., Rockström, J., & Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. Nature, 562, 519–525. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0
85. Unar-Munguía, M., Cervantes-Armenta, M. A., Rodríguez-Ramírez, S., Bonvecchio Arenas, A., Fernández-Gaxiola, A. C., et al. (2024). Mexican national dietary guidelines promote less costly and environmentally sustainable diets. Nature Food, 5, 703–713. https://doi.org/10.1038/s43016-024-01027-5
86. United Nations Environment Programme. (2025). Emissions Gap Report 2025: Off target—Continued collective inaction puts global temperature goal at risk. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48854

87. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2024, October 28). New UN climate change report shows national climate plans “fall miles short of what’s needed”. https://unfccc.int/news/new-un-climate-change-report-shows-national-climate-plans-fall-miles-short-of-what-s-needed
88. United Nations Framework Convention on Climate Change. (s. f.-a). Introducción a la mitigación. https://unfccc.int/es/temas/introduccion-a-la-mitigacion
89. United Nations Framework Convention on Climate Change. (s. f.-b). The Paris Agreement. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement
90. United Nations Framework Convention on Climate Change. (s. f.-c). ¿Qué es el Protocolo de Kyoto? https://unfccc.int/es/kyoto_protocol
91. Uribe, M. D. R., Coe, M. T., Castanho, A. D. A., Macedo, M. N., Valle, D., & Brando, P. M. (2023). Net loss of biomass predicted for tropical biomes in a changing climate. Nature Climate Change, 13(3), 274-281. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01600-z
92. World Commission on Environment and Development. (1987). Our common future. Oxford University Press. http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf
93. Zhang, W., & Chen, A. (2025). Forest carbon dynamics as a constraint on future land-use and land-cover change. Global Change Biology, 31(11), e70628. https://doi.org/10.1111/gcb.70628
94. Zhang, Y., Piao, S., Sun, Y., Rogers, B. M., Li, X., Lian, X., Liu, Z., Chen, A., & Peñuelas, J. (2022). Future reversal of warming-enhanced vegetation productivity in the Northern Hemisphere. Nature Climate Change, 12(6), 581-586. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01374-w

ANEXO A Superficie protegida por categoría de Uso del Suelo y Vegetación de la Serie VII del INEGI y región GCAM

Tabla A.1. Superficie protegida (km²) por categoría de Uso del Suelo y Vegetación (USV) de la Serie VII del INEGI y región GCAM.
Debido al número de regiones GCAM, la Tabla A.1 se presenta en tres bloques de columnas. Las categorías de USV se repiten en cada bloque para conservar la correspondencia entre filas. Los valores originales fueron convertidos de m² a km² (1 km² = 1 000 000 m²).

Tabla A.1 (bloque 1 de 3)

Categoría de USV	Baja California	California River Basin	Grijalva Usumacinta	Isthmus of Tehuantepec	Lower Colorado River Basin	Mexico Interior
ACUÍCOLA	24.70		0.11	4.91	14.12	
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL			3.22	423.69		14.88
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y PERMANENTE				27.53		
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y SEMIPERMANENTE						
AGRICULTURA DE HUMEDAD PERMANENTE						
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE				3.58		
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE						
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	1,081.91	34.43	936.66	357.80	691.12	4,518.16
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE	380.34	17.76	61.29	97.74	874.80	429.96
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	1,537.09	393.37	63.36	525.42	2,328.35	4,583.11
AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE	41.25	6.80	45.78	7.15	49.72	132.35
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE			354.75	153.24		232.99
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE					86.65	153.22
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	854.84	161.37	9,422.43	6,520.12	11.59	22,614.79
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	13.00	16.56	1,475.29	1,369.55		449.97
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE			384.44	607.03		4.19
AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE	0.82		2,395.87	2,629.96		72.55
AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE			441.84	664.25		0.74
AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE			159.35	257.28		
ASENTAMIENTOS HUMANOS	562.21	679.24	891.94	1,125.18	341.94	1,308.00
BOSQUE CULTIVADO		1.25	246.21	225.97	1.41	4.56
BOSQUE DE AYARÍN						25.30
BOSQUE DE CEDRO	0.99		2.29			
BOSQUE DE ENCINO	317.88	15.38	379.49	88.44	1,475.15	1,300.34
BOSQUE DE ENCINO-PINO	35.81		375.09	222.63	76.46	929.20
BOSQUE DE GALERÍA	14.90	5.78	1.45		5.76	
BOSQUE DE MEZQUITE	114.79				30.75	369.04
BOSQUE DE OYAMEL			23.61	4.54		
BOSQUE DE PINO	1,039.63	335.03	1,294.86	1,120.37	11.54	4,099.37
BOSQUE DE PINO-ENCINO	44.54		1,250.44	1,516.16	64.56	2,382.37

Categoría de USV	Baja California	California River Basin	Grijalva Usumacinta	Isthmus of Tehuantepec	Lower Colorado River Basin	Mexico Interior
BOSQUE DE TÁSCATE	161.99	8.27		3.89	28.99	159.49
BOSQUE INDUCIDO		14.45		4.11	26.72	
BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA			1,993.02	1,178.74		
CHAPARRAL	11,201.34	1,596.75		52.18		1,189.53
CUERPO DE AGUA	175.83	10.30	1,343.79	590.72	53.64	481.71
DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	307.78		29.10	39.23	11.15	100.67
MANGLAR	252.96		980.97	760.41		
MATORRAL CRASICAULE					6.64	4,156.42
MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	15,787.53	435.38			20,560.56	62,033.80
MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	6,589.39	14.54				53,562.38
MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO						
MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO	4,322.11					
MATORRAL SARCOCAULE	37,192.79				3,964.47	
MATORRAL SARCO-CRASICAULE	22,018.47					
MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLINA	5,447.59					
MATORRAL SUBMONTANO						1,518.58
MATORRAL SUBTROPICAL						
MEZQUITAL TROPICAL						
MEZQUITAL XERÓFILO	983.03				1,842.86	608.84
PALMAR INDUCIDO	3.06		1.69	216.23		
PALMAR NATURAL	16.38		1.91	38.33		
PASTIZAL CULTIVADO	146.52	2.12	20,283.60	15,448.78	799.08	14.60
PASTIZAL GIPSÓFILO						381.32
PASTIZAL HALÓFILO	26.88		1.44	72.55		5,825.41
PASTIZAL INDUCIDO	876.43	540.30	2,983.58	1,771.30	1,828.31	3,234.47
PASTIZAL NATURAL	0.86	0.00			3,502.35	10,814.42
POPAL			1,101.78	771.48		
PRADERA DE ALTA MONTAÑA						
SABANA			382.81	293.25		
SABANOIDE			230.49	395.14		
SELVA ALTA PERENNIFOLIA			6,204.93	3,477.24		
SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA						
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	3,800.89		53.85	3,655.85		2.87
SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA				17.11		
SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA			246.37			
SELVA BAJA PERENNIFOLIA			13.11	25.56		
SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA						

Categoría de USV	Baja California	California River Basin	Grijalva Usumacinta	Isthmus of Tehuantepec	Lower Colorado River Basin	Mexico Interior
SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA			32.69	125.47		
SELVA DE GALERÍA	1.34		25.49	22.86		
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA				1,189.84		
SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA				7.18		
SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA			386.69	530.78		
SIN VEGETACIÓN APARENTE	3,453.01	31.43	32.57	203.72	1,527.03	855.00
TULAR	2.86		3,771.10	975.85	27.89	
VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS	4,145.89				10,404.78	1,277.75
VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS	563.10			39.77	65.89	
VEGETACIÓN DE GALERÍA	750.02	20.04	1.25	9.67	154.07	36.02
VEGETACIÓN DE PETÉN						
VEGETACIÓN GIPSÓFILA						435.62
VEGETACIÓN HALÓFILA HIDRÓFILA	320.47		25.03	38.25	548.57	
VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	8,678.60				375.21	5,693.47
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE AYARÍN						4.83
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE CEDRO						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO			391.43	775.77	3.03	228.10
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO			287.44	479.95		352.99
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE GALERÍA			0.42	0.74		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE MEZQUITE				0.44		4.07
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE OYAMEL						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO	24.20		656.28	1,841.65		400.28
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO			1,799.43	3,894.80		688.65
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE TÁSCATE				2.41		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA			1,589.72	691.69		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE MANGLAR			1.52	54.06		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE MEZQUITAL TROPICAL						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE PALMAR NATURAL	6.41					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA			4,734.46	2,480.26		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA			0.65			
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA			751.45	1,065.38		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA				7.82		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA			174.67			
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA			1.06			
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA				12.50		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA			0.66	3.12		

Categoría de USV	Baja California	California River Basin	Grijalva Usumacinta	Isthmus of Tehuantepec	Lower Colorado River Basin	Mexico Interior
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA DE GALERÍA			13.35	4.00		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA				221.79		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA			162.26	254.35		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA			1,066.95	740.02		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE VEGETACIÓN DE PETÉN						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE AYARÍN						44.58
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE CEDRO	1.76					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	204.62		740.01	3,654.33	1,147.04	2,031.24
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO			619.32	1,298.03	1.39	820.72
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE GALERÍA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE MEZQUITE				7.55		288.45
VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE OYAMEL						9.18
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO	20.78	31.47	1,213.96	1,463.33		2,431.61
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO			2,144.63	3,898.93	9.90	1,586.62
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE TÁSCATE	30.39	33.81		10.07		207.79
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA			1,517.18	817.85		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE CHAPARRAL	904.31	830.99		17.71		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MANGLAR	13.81		45.65	338.88		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL CRASICAULE						1,019.25
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	137.61	2.21			979.23	13,276.59
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	11.03					2,155.24
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO	260.24	2.17				
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCOCAULE	656.93				39.21	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE	225.41					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLI	168.35					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBMONTANO						153.24
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBTROPICAL						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL TROPICAL						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL XERÓFILO	4.87				431.79	139.87
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PALMAR NATURAL	10.53					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL GIPSÓFILO						21.16
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL HALÓFILO						1,536.55
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL					504.51	14,065.36
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA			2,651.43	3,462.23		

Categoría de USV	Baja California	California River Basin	Grijalva Usumacinta	Isthmus of Tehuantepec	Lower Colorado River Basin	Mexico Interior
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	1.01		2,358.09	3,022.56		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA				514.93		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLI			141.78			
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA				2.76		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA				16.31		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA			2.25	59.53		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA DE GALERÍA			0.39	1.47		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA				292.94		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA			282.48	1,509.73		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA			371.54	1,158.41		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS	5.86				182.02	19.85
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE GALERÍA						6.46
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA HIDRÓFILA				0.87	51.14	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	51.97				108.68	2,018.44
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO			3.65	7.26		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO			1.64			
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE OYAMEL						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO			14.32			39.57
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO			1.75			52.06
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE TÁSCATE						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA			26.35			
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MANGLAR						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL CRASICAULE						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DE CONIFERAS						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	0.33				12.67	6.74
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO						33.07
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO	16.68					
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLI	7.51					
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE PALMAR NATURAL						

Categoría de USV	Baja California	California River Basin	Grijalva Usumacinta	Isthmus of Tehuantepec	Lower Colorado River Basin	Mexico Interior
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE PASTIZAL NATURAL						3.14
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA				167.29		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA			47.14	4.53		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLI						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS				0.12		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	6.15					1.91
Total general	**136,062.55**	**5,241.22**	**84,152.31**	**84,166.40**	**55,262.76**	**239,655.08**

Fuente: Elaboración propia a partir de la base geoespacial de la investigación.

Tabla A.1 (continuación, bloque 2 de 3)

Categoría de USV	Mexico Northwest Coast	North Gulf	Pacific Central Coast	Papaloapan	Rfo Balsas	Rfo Lerma
ACUÍCOLA	1,252.14	13.26	26.99		3.53	
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL	0.45	0.33	29.75	108.54	85.21	381.21
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y PERMANENTE		82.07		2.83	1.26	
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y SEMIPERMANENTE		25.48	158.70	36.66	23.00	
AGRICULTURA DE HUMEDAD PERMANENTE		38.51		3.84		
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE		18.43	121.61			7.49
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE		117.78		16.56		
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	20,904.79	3,707.32	700.20	272.33	2,115.35	9,649.48
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE	2,053.27	809.84	576.31	112.25	2,518.72	296.53
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	2,746.11	37.21	791.19	666.20	2,807.96	4,856.57
AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE	1,062.43	421.75	305.59	8.50	1,726.96	378.71
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE	69.00		868.74	347.09	1,610.71	140.01
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	8.55		824.37	49.25	322.65	7.00
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	20,678.27	13,073.78	4,571.79	4,911.81	23,261.41	32,709.35
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	530.10	4,165.16	558.76	987.92	3,152.60	1,009.87
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE	22.75	208.56	964.37	4,870.25	112.87	852.47
AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE	279.22	3,504.09	108.09	1,753.19	876.24	276.06
AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE		76.13	390.71	4,534.73	2.62	443.68
AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE		639.14	262.31	1,589.97	65.73	62.66
ASENTAMIENTOS HUMANOS	2,011.05	742.00	695.69	937.69	3,045.43	3,331.92
BOSQUE CULTIVADO	4.87	10.49		81.09	60.53	60.90
BOSQUE DE AYARÍN	131.17					
BOSQUE DE CEDRO						15.91
BOSQUE DE ENCINO	30,653.62	1,429.87	3,771.65	297.60	4,372.22	6,913.90
BOSQUE DE ENCINO-PINO	12,982.94	616.89	989.74	123.59	2,397.37	3,749.31
BOSQUE DE GALERÍA	70.83	8.50	1.63		17.67	
BOSQUE DE MEZQUITE	738.21	152.70	3.37	16.61		4.98
BOSQUE DE OYAMEL	11.86	47.67	48.78	36.88	650.59	287.40
BOSQUE DE PINO	27,413.59	980.01	1,822.78	679.96	3,815.38	1,115.83
BOSQUE DE PINO-ENCINO	18,445.96	2,152.99	4,263.56	1,358.26	8,944.86	4,911.52
BOSQUE DE TÁSCATE	167.87	26.34		14.19	304.31	87.79
BOSQUE INDUCIDO	2.31					
BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	184.36	537.65	436.98	1,452.38	1,383.92	137.83
CHAPARRAL	1.79			90.44	360.18	
CUERPO DE AGUA	2,084.13	875.04	198.94	756.60	1,270.34	2,250.28
DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	136.42	16.06	34.11	12.13	74.44	42.46
MANGLAR	1,607.16	204.88	182.32	125.81	120.60	7.23
MATORRAL CRASICAULE	1,413.65	7.43		528.08	485.80	1,516.43
MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	33,356.81	24.24				145.17
MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	1,368.73	319.49		491.32	942.64	19.59
MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO		2,170.40				
MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO						
MATORRAL SARCOCAULE	9,945.89					

Categoría de USV	Mexico Northwest Coast	North Gulf	Pacific Central Coast	Papaloapan	Rfo Balsas	Rfo Lerma
MATORRAL SARCO-CRASICAULE	708.88					
MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLINA	72.07					
MATORRAL SUBMONTANO		5,995.18				
MATORRAL SUBTROPICAL	9,658.30					
MEZQUITAL TROPICAL	700.26	50.85	3.26			
MEZQUITAL XERÓFILO	11,528.21	747.31			1.49	38.34
PALMAR INDUCIDO		14.57		20.26	617.12	
PALMAR NATURAL	20.05		31.82			
PASTIZAL CULTIVADO	9,043.93	18,844.57	3,861.79	10,736.30	8,233.87	53.80
PASTIZAL GIPSÓFILO						
PASTIZAL HALÓFILO	3,673.81	83.65	2.53		313.59	23.48
PASTIZAL INDUCIDO	10,043.98	563.74	2,498.31	567.73	10,152.19	10,082.31
PASTIZAL NATURAL	14,588.75	0.48				5,069.47
POPAL			4.93	91.74	9.65	
PRADERA DE ALTA MONTAÑA			32.27	9.95	113.94	3.84
SABANA				8.86		
SABANOIDE	121.71		117.05	58.79	206.57	39.00
SELVA ALTA PERENNIFOLIA		0.58		2,301.96		
SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA		4.60				
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	32,662.79	1,824.12	1,932.32	1,409.23	7,171.27	4,565.51
SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	627.55	1,242.35			7.07	
SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA						
SELVA BAJA PERENNIFOLIA						
SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA			0.15			
SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA						
SELVA DE GALERÍA		0.80	1.67	10.48	0.36	1.05
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA			108.54		29.90	
SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	1,260.56		1,555.85		232.30	166.08
SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	154.48		198.49		278.12	50.76
SIN VEGETACIÓN APARENTE	696.47	144.14	68.71	28.16	175.24	66.25
TULAR	67.73	136.95	20.12	428.25	191.47	29.48
VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS	554.02					
VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS	183.43	163.58	31.56	99.18	39.66	1.34
VEGETACIÓN DE GALERÍA	390.75	38.57	1.71			31.16
VEGETACIÓN DE PETÉN						
VEGETACIÓN GIPSÓFILA						
VEGETACIÓN HALÓFILA HIDRÓFILA	571.49	1,127.03	58.08		4.03	80.34
VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	2,347.18	251.95				0.88

Categoría de USV	Mexico Northwest Coast	North Gulf	Pacific Central Coast	Papaloapan	Rfo Balsas	Rfo Lerma
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE AYARÍN	33.87					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE CEDRO		0.65			0.01	6.49
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	1,578.43	23.18	921.43	563.73	1,942.60	1,538.81
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	533.22	32.95	228.97	537.15	1,059.94	665.10
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE GALERÍA					4.31	1.39
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE MEZQUITE	0.83			7.67		6.84
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE OYAMEL		20.77			98.54	40.41
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO	1,689.97	264.42	575.20	330.12	1,397.12	805.34
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	1,869.42	258.77	928.39	757.74	2,365.82	2,085.38
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE TÁSCATE		39.27			55.73	5.73
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	159.30	603.37	32.61	1,268.05	312.72	13.42
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE MANGLAR	24.37		15.10	4.02	5.86	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE MEZQUITAL TROPICAL					2.54	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE PALMAR NATURAL						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA		210.99		1,628.48		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA		234.74		18.29		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	3,671.06	346.96	1,752.15	561.65	7,996.60	2,859.37
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	1,119.26	716.94				
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA		11.72				
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA DE GALERÍA				0.70		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA			6.08		114.32	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	1,163.26		1,642.05	1.20	997.39	221.69
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	398.51	169.37	159.39		221.27	71.40
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE VEGETACIÓN DE PETÉN						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE AYARÍN						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE CEDRO						0.15
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	5,939.74	359.20	3,743.25	1,761.60	8,413.51	6,651.38
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	1,664.48	101.40	621.12	332.00	2,286.97	1,144.53
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE GALERÍA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE MEZQUITE	126.74	13.59		3.66		11.62
VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE OYAMEL		5.55			58.20	28.59
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO	7,047.02	398.25	1,040.29	192.34	1,586.67	508.60
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	2,930.72	273.14	1,659.89	689.24	4,625.05	1,226.07
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE TÁSCATE	10.67	19.38		49.51	686.28	119.90
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	22.69	368.77	68.46	1,358.63	218.31	11.80
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE CHAPARRAL				132.31	255.28	

Categoría de USV	Mexico Northwest Coast	North Gulf	Pacific Central Coast	Papaloapan	Rfo Balsas	Rfo Lerma
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MANGLAR	295.13		14.40	63.74	21.76	6.06
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL CRASICAULE	245.00			6.00	109.59	1,089.00
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	1,426.79	0.48				22.93
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO		94.76		1.62		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO		5,977.45				
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCOCAULE	402.85					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE	15.72					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLI	3.19					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBMONTANO		1,491.28				
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBTROPICAL	3,045.65		76.31			
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL TROPICAL	213.98	0.20				
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL XERÓFILO	1,826.22	60.59				81.00
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PALMAR NATURAL						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL GIPSÓFILO						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL HALÓFILO	116.21					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL	3,308.07	2.48				6,125.34
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA		873.83		2,798.84		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA		45.78				
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	7,928.91	511.05	8,017.61	1,044.97	26,195.19	10,219.72
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	1,338.67	408.32	41.56		1.00	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLI					13.79	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA				4.28		35.69
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA DE GALERÍA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA			14.71		47.89	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA				15.53		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	353.30		2,912.53	21.16	1,034.42	130.70
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	67.03	67.41	37.59		68.45	5.66
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS						
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS		1.15		34.29		
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE GALERÍA	6.81					
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA HIDRÓFILA		17.11				

Categoría de USV	Mexico Northwest Coast	North Gulf	Pacific Central Coast	Papaloapan	Rfo Balsas	Rfo Lerma
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	165.74	22.86				
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO	12.24	4.45	25.15	2.73	70.57	64.54
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	16.94					26.42
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE OYAMEL		0.20				
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO	8.14			2.27		1.87
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	16.38				14.02	46.77
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE TÁSCATE	0.75				3.67	
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	5.00	10.78		4.93		1.59
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MANGLAR	1.07					
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL CRASICAULE						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DE CONIFERAS		0.66				
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO		0.12				
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE	1.59					
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLI						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE PALMAR NATURAL						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE PASTIZAL NATURAL						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA		167.09		187.60		
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA		1.62				
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	4.97		23.99	7.04	11.34	212.01
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA					0.68	
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLI						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	8.06			4.96	0.61	2.90
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	1.02					
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS						
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA						
Total general	**342,835.69**	**82,729.62**	**58,796.44**	**57,443.47**	**157,008.94**	**132,068.81**

Fuente: Elaboración propia a partir de la base geoespacial de la investigación.

Tabla A.1 (continuación, bloque 3 de 3)

Categoría de USV	Rfo Verde	Rio Grande River Basin	Southern Central America	Yucatan Peninsula	Total general
ACUÍCOLA			0.72	3.95	1,344.44
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL	26.91	12.62		56.44	1,143.24
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y PERMANENTE				11.94	125.63
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y SEMIPERMANENTE	2.04			11.84	257.73
AGRICULTURA DE HUMEDAD PERMANENTE					42.35
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE	5.94				157.06
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE					134.33
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	2,307.21	6,622.81	25.51	1,006.40	54,931.48
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE	346.09	1,218.81	2.53	360.93	10,157.18
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	3,498.77	3,815.17	26.45	16.06	28,692.38
AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE	110.43	832.18	1.23	580.36	5,711.18
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE	1,736.08	152.24	160.28	138.79	5,963.92
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	26.90	275.23	17.46	49.98	1,821.27
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	16,199.51	8,709.57	168.17	6,223.88	170,092.67
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	2,651.92	129.47	233.63	155.70	16,899.49
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE	1,797.50	8.65	1.91	11.24	9,846.23
AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE	779.82	174.97	786.63	685.60	14,323.12
AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE	1,174.54		1.25	805.01	8,535.50
AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	182.58		0.68	9.09	3,228.79
ASENTAMIENTOS HUMANOS	3,101.37	3,250.79	80.19	1,778.03	23,882.69
BOSQUE CULTIVADO	88.12		7.53	256.79	1,049.72
BOSQUE DE AYARÍN		95.81			252.29
BOSQUE DE CEDRO					19.18
BOSQUE DE ENCINO	5,536.77	7,919.91			64,472.22
BOSQUE DE ENCINO-PINO	1,794.54	5,420.14			29,713.72
BOSQUE DE GALERÍA		67.05			193.58
BOSQUE DE MEZQUITE	400.67	360.85			2,191.97
BOSQUE DE OYAMEL	187.53	17.99			1,316.84
BOSQUE DE PINO	1,240.62	4,014.99	29.84		49,013.80
BOSQUE DE PINO-ENCINO	1,604.40	4,445.04			51,384.66
BOSQUE DE TÁSCATE	229.97	265.64			1,458.73
BOSQUE INDUCIDO	2.16	3.78			53.54
BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	956.31		53.21		8,314.39
CHAPARRAL		3,865.34			18,357.56
CUERPO DE AGUA	1,173.52	1,342.11	3.26	640.82	13,251.06
DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	45.43	185.95	0.65	175.58	1,211.14
MANGLAR	57.46		45.94	3,447.66	7,793.42
MATORRAL CRASICAULE	2,975.94	20.08			11,110.47
MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	642.44	51,224.22			184,210.15
MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	830.33	38,747.78			102,886.18
MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO		21,369.37			23,539.76

Categoría de USV	Rfo Verde	Rio Grande River Basin	Southern Central America	Yucatan Peninsula	Total general
MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO					4,322.11
MATORRAL SARCOCAULE	2.45				51,105.61
MATORRAL SARCO-CRASICAULE					22,727.35
MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLINA					5,519.66
MATORRAL SUBMONTANO	6,365.01	9,482.86			23,361.63
MATORRAL SUBTROPICAL					9,658.30
MEZQUITAL TROPICAL	457.37				1,211.74
MEZQUITAL XERÓFILO	158.96	3,205.25			19,114.27
PALMAR INDUCIDO	28.03	15.51	14.11	1.35	931.92
PALMAR NATURAL	40.53			38.12	187.14
PASTIZAL CULTIVADO	9,362.76	14,032.82	269.40	15,107.04	126,240.98
PASTIZAL GIPSÓFILO					381.32
PASTIZAL HALÓFILO	137.87	5,918.19		100.42	16,179.82
PASTIZAL INDUCIDO	4,405.72	5,673.96	17.82	229.58	55,469.74
PASTIZAL NATURAL	1,123.77	23,354.44			58,454.55
POPAL			6.22		1,985.80
PRADERA DE ALTA MONTAÑA	14.04		1.71		175.74
SABANA				592.29	1,277.21
SABANOIDE					1,168.75
SELVA ALTA PERENNIFOLIA	30.08				12,014.80
SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA	0.97			656.96	662.53
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	4,002.79			24.12	61,105.60
SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	63.00				1,957.07
SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA				5,446.97	5,693.35
SELVA BAJA PERENNIFOLIA					38.66
SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA	91.37			200.43	291.95
SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA				818.89	977.04
SELVA DE GALERÍA	4.16				68.20
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA				0.48	1,328.77
SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	71.86			1,884.33	5,178.17
SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	175.66			23,599.38	25,374.35
SIN VEGETACIÓN APARENTE	121.32	1,050.65	0.55	346.73	8,800.98
TULAR	300.23	1.70	60.69	3,291.16	9,305.48
VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS		4,712.07			21,094.50
VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS	11.51	32.22		116.28	1,347.52
VEGETACIÓN DE GALERÍA	3.21	323.56			1,760.03
VEGETACIÓN DE PETÉN				476.12	476.12
VEGETACIÓN GIPSÓFILA		53.64			489.26

Categoría de USV	Rfo Verde	Rio Grande River Basin	Southern Central America	Yucatan Peninsula	Total general
VEGETACIÓN HALÓFILA HIDRÓFILA	106.68	575.05		2.31	3,457.32
VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	273.37	4,791.48			22,412.13
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE AYARÍN					38.71
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE CEDRO					7.15
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	478.14	400.17		226.32	9,071.14
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	184.01	153.72			4,515.45
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE GALERÍA					6.85
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE MEZQUITE		19.12			38.98
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE OYAMEL	0.06				159.77
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO	22.89	356.99	9.97		8,374.44
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	101.77	184.09	2.22		14,936.49
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE TÁSCATE	194.40				297.54
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	160.95		49.72		4,881.55
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE MANGLAR			16.59	18.75	140.27
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE MEZQUITAL TROPICAL					2.54
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE PALMAR NATURAL					6.41
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA	404.89				9,459.08
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA	57.32			170.83	481.83
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	829.82		0.16	1,842.64	21,677.26
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA			2.92	288.10	2,135.04
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA				3,028.88	3,215.27
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA					1.06
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA				152.87	165.37
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA				147.73	151.51
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA DE GALERÍA			3.68	10.77	32.50
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA				6,648.85	6,991.04
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA			0.33	20,129.05	24,571.58
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	936.82		1.14	18,179.58	21,944.45
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE VEGETACIÓN DE PETÉN				37.65	37.65
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE AYARÍN		102.03			146.61
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE CEDRO		0.85			2.75
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	4,715.50	2,942.45		35.06	42,338.94
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	369.23	1,687.56			10,946.74
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE GALERÍA		11.41			11.41
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE MEZQUITE	158.08	175.01			784.69

Categoría de USV	Rfo Verde	Rio Grande River Basin	Southern Central America	Yucatan Peninsula	Total general
VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE OYAMEL	15.61	14.03			131.15
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO	521.21	2,714.94	4.24		19,174.69
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	576.53	1,374.33	0.28		20,995.33
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE TÁSCATE	585.32	128.50			1,881.62
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	543.25		46.82		4,973.76
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE CHAPARRAL		77.90			2,218.51
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MANGLAR			0.88	191.39	991.71
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL CRASICAULE	2,170.32				4,639.16
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	108.64	8,357.49			24,311.97
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	149.02	1,472.77			3,884.43
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO		3,389.92			9,367.37
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO					262.41
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCOCAULE					1,098.99
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE					241.13
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLI					171.54
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBMONTANO	1,306.36	1,610.20			4,561.08
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBTROPICAL					3,121.96
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL TROPICAL	3.08				217.25
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL XERÓFILO	94.41	467.82			3,106.57
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PALMAR NATURAL					10.53
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL GIPSÓFILO					21.16
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL HALÓFILO		108.96			1,761.72
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL	705.50	12,399.19			37,110.44
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA	1,263.12				11,049.46
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA	12.73			6.52	65.04
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	1,882.08		1.52	682.06	61,864.78
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA				122.65	2,427.12
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLI				1,988.02	2,143.60
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA					2.76
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA	0.56			7.53	64.36
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA				33.16	94.95
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA DE GALERÍA			1.99		3.85
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA				1,843.77	2,199.32
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA					15.53
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	57.90			3,793.95	10,096.16

Categoría de USV	Rfo Verde	Rio Grande River Basin	Southern Central America	Yucatan Peninsula	Total general
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	1,033.14		6.14	4,910.11	7,725.48
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS		10.89			218.62
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS			0.31		35.75
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE GALERÍA	1.31	19.45			34.02
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA HIDRÓFILA					69.12
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA	150.29	188.23			2,706.20
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO	44.65				235.24
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	45.09				90.08
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE OYAMEL					0.20
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO		13.73			79.91
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	29.07				160.05
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE TÁSCATE	12.31				16.72
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	40.87				89.52
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MANGLAR					1.07
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL CRASICAULE	31.93				31.93
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DE CONIFERAS					0.66
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO					19.74
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO					33.07
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO		17.99			18.11
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO					16.68
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE					1.59
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLI					7.51
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE PALMAR NATURAL				25.48	25.48
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE PASTIZAL NATURAL					3.14
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA	110.08				632.07
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA				5.63	7.25
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	25.56			31.07	367.65
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA					0.68
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLI				20.21	20.21
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA				5.02	5.02
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA				7.81	24.34
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA	59.60			21.62	82.24
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS			2.70		2.82
VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA					8.07
Total general	**99,259.87**	**276,191.73**	**2,169.20**	**133,972.14**	**1,947,016.24**

Fuente: Elaboración propia a partir de la base geoespacial de la investigación.

Tabla A.2. Superficie protegida (km²) por región GCAM y categoría de uso del suelo de GCAM

Región GCAM	crops	rock and desert	shrubs	tundra	urban	water	forest	grass and pasture	Total general
Baja_California	227.20	2,415.52	28,572.83		39.52	161.11	1,582.33	20,401.53	53,400.05
California_River_Basin	0.00	0.00	5.56		0.00	0.00	18.35	103.05	126.96
Grijalva_Usumacinta	513.81	21.05	1,170.58		78.15	284.94	9,083.64	5,336.73	16,488.90
Isthmus_of_Tehuantepec	350.92	24.43	1,518.56		15.44	36.91	5,773.04	1,027.41	8,746.70
Lower_Colorado_River_Basin	23.21	1,286.25	683.73		6.17	21.66	77.53	7,697.31	9,795.87
Mexico_Interior	194.92	26.37	685.51		3.38	44.93	592.32	7,528.33	9,075.77
Mexico_Northwest_Coast	562.47	62.01	3,398.49		4.36	181.81	15,877.70	2,235.41	22,322.25
North_Gulf	727.31	128.61	705.83		25.58	274.77	2,197.95	1,622.36	5,682.41
Pacific_Central_Coast	378.93	14.66	2,130.17	31.83	6.18	1.26	4,246.95	414.98	7,224.95
Papaloapan	771.91	8.03	1,794.98	9.95	68.70	3.17	2,956.06	1,239.87	6,852.66
Rfo_Balsas	1,559.76	70.20	3,211.83	111.73	82.31	98.32	6,660.91	827.23	12,622.30
Rfo_Lerma	622.69	5.95	3,352.46	3.84	5.30	141.68	8,931.92	1,642.04	14,705.86
Rfo_Verde	850.14	79.65	4,025.38	14.04	54.92	42.63	4,062.78	875.20	10,004.75
Rio_Grande_River_Basin	666.75	279.49	8,798.92		18.19	212.55	4,393.56	19,839.18	34,208.64
Southern_Central_America	33.20	0.16	1.75	1.71	0.70	0.89	76.71	69.31	184.42
Yucatan_Peninsula	84.85	320.53	546.77		23.29	236.25	21,911.48	2,570.66	25,693.84
Total general	**7,568.07**	**4,742.90**	**60,603.36**	**173.09**	**432.20**	**1,742.87**	**88,443.23**	**73,430.60**	**237,136.32**

Nota: La tabla presenta la superficie protegida, expresada en km², para cada región GCAM, desagregada de acuerdo con las categorías de uso del suelo empleadas en el modelo. Los valores originales fueron convertidos de m² a km². El total general corresponde a la suma de la superficie protegida considerada en el análisis.

Tabla A.3. Porcentaje de área protegida por región GCAM y categoría de uso del suelo de GCAM

Región GCAM	crops	rock and desert	shrubs	tundra	urban	water	forest	grass and pasture	Total general
Baja_California	5.81%	64.23%	33.84%	#N/D	7.03%	80.34%	27.11%	54.62%	22.52%
California_River_Basin	0.00%	0.00%	0.22%	#N/D	0.00%	0.00%	4.83%	10.36%	0.05%
Grijalva_Usumacinta	3.26%	34.13%	9.61%	#N/D	8.76%	21.20%	36.12%	18.54%	6.95%
Isthmus_of_Tehuantepec	2.57%	10.05%	6.97%	#N/D	1.37%	6.20%	21.41%	5.19%	3.69%
Lower_Colorado_River_Basin	0.57%	83.62%	9.00%	#N/D	1.80%	31.96%	4.50%	19.27%	4.13%
Mexico_Interior	0.59%	2.76%	4.19%	#N/D	0.26%	9.33%	5.41%	4.27%	3.83%
Mexico_Northwest_Coast	1.16%	7.44%	5.05%	#N/D	0.22%	5.45%	11.33%	2.76%	9.41%
North_Gulf	2.70%	80.28%	3.51%	#N/D	3.45%	30.93%	17.96%	7.49%	2.40%
Pacific_Central_Coast	3.37%	14.25%	11.64%	98.63%	0.89%	0.56%	19.65%	6.29%	3.05%
Papaloapan	3.81%	19.93%	19.30%	100.00%	7.33%	0.42%	21.72%	9.90%	2.89%
Rfo_Balsas	4.03%	28.12%	6.90%	98.06%	2.70%	7.72%	14.18%	4.12%	5.32%
Rfo_Lerma	1.22%	5.47%	14.44%	100.00%	0.16%	6.30%	29.38%	7.57%	6.20%
Rfo_Verde	2.76%	47.77%	15.96%	100.00%	1.77%	3.63%	19.88%	4.78%	4.22%
Rio_Grande_River_Basin	3.04%	22.60%	16.60%	#N/D	0.56%	15.84%	18.51%	11.56%	14.43%
Southern_Central_America	2.33%	13.21%	2.83%	100.00%	0.87%	22.23%	32.32%	19.41%	0.08%
Yucatan_Peninsula	0.84%	61.37%	3.98%	#N/D	1.31%	36.64%	24.98%	13.22%	10.84%
Total general	**3.19%**	**2.00%**	**25.56%**	**0.07%**	**0.18%**	**0.73%**	**37.30%**	**30.97%**	**100.00%**

Nota: La tabla presenta los porcentajes de área protegida por región GCAM y categoría de uso del suelo de GCAM, conservando los valores y los registros #N/D de la tabla original. La fila «Total general» muestra la distribución porcentual del total de superficie protegida entre las categorías de uso del suelo de GCAM y, por tanto, su lectura difiere de la de los porcentajes presentados para cada región.

Tabla A.4. Superficie protegida (km²) por región GCAM y categoría de manejo de Área Natural Protegida

Región GCAM	Áreas de Protección de Flora y Fauna	Áreas de Protección de Recursos Naturales	Monumento Natural	Parques Nacionales	Reservas de la Biósfera	Santuario	Total general
Baja_California	26,553.85			1,013.87	25,311.10		52,878.82
Grijalva_Usumacinta	3,305.08	1,775.43	67.87	306.50	10,169.63		15,624.52
Isthmus_of_Tehuantepec	45.06	202.35	10.75	238.87	2,189.74	10.97	2,697.74
Lower_Colorado_River_Basin	91.12				9,460.57		9,551.69
Mexico_Interior	2,988.52	2,177.02			3,425.38		8,590.92
Mexico_Northwest_Coast	12,605.70	6,887.25		69.27	2,194.68	11.75	21,768.65
North_Gulf	2,673.05	526.98		60.48	2,196.29	15.58	5,472.38
Pacific_Central_Coast	617.64	2,320.73		188.35	3,991.52	10.97	7,129.21
Papaloapan		11.85		518.08	5,623.61	0.03	6,153.57
Rfo_Balsas	840.02	1,339.80		1,581.61	7,816.53	5.41	11,583.36
Rfo_Lerma	605.51	13,768.99		48.27	130.82		14,553.59
Rfo_Verde	666.04	175.60		783.97	8,274.20		9,899.81
Rio_Grande_River_Basin	10,591.91	16,652.03	65.01	1,822.13	4,453.02		33,584.10
Southern_Central_America					183.92		183.92
Yucatan_Peninsula	5,434.58			76.22	17,775.53	4.69	23,291.02
Total general	**67,018.07**	**45,838.04**	**143.63**	**6,707.62**	**103,196.55**	**59.39**	**222,963.30**

Nota: La tabla presenta la superficie protegida, expresada en km², correspondiente a cada región GCAM, desagregada según la categoría de manejo de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) considerada en el análisis. Los valores originales fueron convertidos de m² a km². Las celdas sin valor indican que no se registró superficie para la combinación correspondiente.

Tabla A.5. Distribución porcentual del área protegida por región GCAM y categoría de manejo de Área Natural Protegida

Región GCAM	Áreas de Protección de Flora y Fauna	Áreas de Protección de Recursos Naturales	Monumento Natural	Parques Nacionales	Reservas de la Biósfera	Santuario	Total general
Baja_California	50.22%	0.00%	0.00%	1.92%	47.87%	0.00%	100%
Grijalva_Usumacinta	21.15%	11.36%	0.43%	1.96%	65.09%	0.00%	100%
Isthmus_of_Tehuantepec	1.67%	7.50%	0.40%	8.85%	81.17%	0.41%	100%
Lower_Colorado_River_Basin	0.95%	0.00%	0.00%	0.00%	99.05%	0.00%	100%
Mexico_Interior	34.79%	25.34%	0.00%	0.00%	39.87%	0.00%	100%
Mexico_Northwest_Coast	57.91%	31.64%	0.00%	0.32%	10.08%	0.05%	100%
North_Gulf	48.85%	9.63%	0.00%	1.11%	40.13%	0.28%	100%
Pacific_Central_Coast	8.66%	32.55%	0.00%	2.64%	55.99%	0.15%	100%
Papaloapan	0.00%	0.19%	0.00%	8.42%	91.39%	0.00%	100%
Rfo_Balsas	7.25%	11.57%	0.00%	13.65%	67.48%	0.05%	100%
Rfo_Lerma	4.16%	94.61%	0.00%	0.33%	0.90%	0.00%	100%
Rfo_Verde	6.73%	1.77%	0.00%	7.92%	83.58%	0.00%	100%
Rio_Grande_River_Basin	31.54%	49.58%	0.19%	5.43%	13.26%	0.00%	100%
Southern_Central_America	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100%
Yucatan_Peninsula	23.33%	0.00%	0.00%	0.33%	76.32%	0.02%	100%
Total general	**30.06%**	**20.56%**	**0.06%**	**3.01%**	**46.28%**	**0.03%**	**100%**

Nota: La tabla presenta la distribución porcentual de la superficie protegida de cada región GCAM según la categoría de manejo de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) considerada en el análisis. Los porcentajes de cada región suman 100 %. La fila «Total general» muestra la distribución porcentual de la superficie protegida total entre las distintas categorías de manejo de ANP.

Tabla A.6. Superficie por región GCAM y ecorregión, y factores de emisión asociados

Tabla A.6 (continuación). Bloque 1 de ecorregiones

Región GCAM	Altiplanicie Mexicana	California Mediterranea	Cuerpos de agua	Depresiones Intermontanas	Desiertos Calidos	Piedemonte de la Sierra Madre Occidental
Baja_California		17,289.02			65,356.58	
California_River_Basin		2,882.54			12.85	
Grijalva_Usumacinta				4,297.96		
Isthmus_of_Tehuantepec				996.81		
Lower_Colorado_River_Basin					6,622.63	2,699.12
Mexico_Interior			0.01		8,676.66	5,135.66
Mexico_Northwest_Coast			26.53		22,866.13	13,181.92
North_Gulf			6.15		14.90	
Pacific_Central_Coast	57.87		4.05	207.20		
Papaloapan				2,967.67		
Rfo_Balsas	905.71		1.00	42,174.30		
Rfo_Lerma	11,401.09		2.94		285.89	5,257.94
Rfo_Verde	4,988.48				1,702.70	469.85
Rio_Grande_River_Basin			1.01		14,413.35	6,703.63
Southern_Central_America						
Yucatan_Peninsula						
Total general	**17,353.15**	**20,171.56**	**41.69**	**50,643.95**	**119,951.69**	**33,448.12**

Tabla A.7. Factores de emisión por ecorregión para la conversión FL-FL

Conversión	Ecorregión I	Ecorregión II	BA	BS	MM	Man	COS	Unidades
FL-FL	Elevaciones Semiaridas Meridionales	Altiplanicie Mexicana	-0.14	-0.04	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	California Mediterranea	California Mediterranea	-0.05	-0.02	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Grandes Planicies	Cuerpos de agua	-	-	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Depresiones Intermontanas	0.44	0.14	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Desiertos de America del Norte	Desiertos Calidos	0.01	0.01	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Elevaciones Semiaridas Meridionales	Piedemonte de la Sierra Madre Occidental	0.17	0.06	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Grandes Planicies	Planicie costera de Texas-Louisiana	-0.07	-0.03	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Planicie Costera y Lomerios del Pacifico Sur	0.75	0.22	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Planicie Costera y Lomerios del Soconusco	-5.13	-1.44	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Planicie Costera y Lomerios Humedos del Golfo de Mexico	2.01	0.61	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Planicie Costera, Lomerios y Canones del Occidente	0.19	0.05	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Planicie Noroccidental de la Peninsula de Yucatan	0.33	0.09	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Grandes Planicies	Planicie semiarida de Tamaulipas-Texas	0.07	0.03	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Planicie y Lomerios de la Peninsula de Yucatan	0.63	0.18	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Planicies Costeras y Lomerios Secos del Golfo de Mexico	0.46	0.15	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Planicies y Lomerios del Occidente	0.33	0.10	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Sierra de Los Tuxtlas	10.70	3.92	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Sierras Templadas	Sierra Madre Centroamericana y Altos de Chiapas	1.87	0.54	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Sierras Templadas	Sierra Madre del Sur	0.93	0.27	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Sierras Templadas	Sierra Madre Occidental	0.12	0.04	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Sierras Templadas	Sierra Madre Oriental	0.61	0.18	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Sierra y Planicies de El Cabo	-0.02	-0.01	-	-	-	C (t/ha)
FL-FL	Sierras Templadas	Sistema Neovolcanico Transversal	0.96	0.31	-	-	-	C (t/ha)

Nota: La tabla presenta los factores de emisión asociados con la conversión FL-FL para las ecorregiones de nivel I y II consideradas en el análisis. BA corresponde a biomasa aérea; BS, a biomasa subterránea; MM, a madera muerta; Man, a mantillo; y COS, a carbono orgánico del suelo. Los factores se expresan en toneladas de carbono por hectárea [C (t/ha)]. Los guiones indican que no se dispone de un valor para el reservorio correspondiente.

Anexo B Insumos de conversiones de uso del suelo y carbono

Este anexo presenta los insumos proporcionados por el Programa de Investigación en Cambio Climático de la UNAM (PINCC-UNAM) para el procesamiento de los escenarios: la correspondencia entre códigos de conversión y subcategorías de uso del suelo, los valores de carbono por reservorio y ecorregión, y una serie anual por conversión y ecorregión. Las tablas reproducen los fragmentos recibidos para esta investigación. La procedencia primaria y algunos criterios de agregación aún requieren confirmación.

Tabla B.1 Correspondencia de subcategorías y códigos de conversión

Id	Subcategoría	Conversión
3B1a	Forest Land Remaining Forest Land	FL-FL
3B1bi	Cropland converted to Forest Land	CL-FL
3B1bii	Grassland converted to Forest Land	GL-FL
3B1biii	Wetlands converted to Forest Land	WL-FL
3B1biv	Settlements converted to Forest Land	SL-FL
3B1bv	Other Land converted to Forest Land	OL-FL
3B2a	Cropland Remaining Cropland	CL-CL
3B2bi	Forest Land converted to Cropland	FL-CL
3B2bii	Grassland converted to Cropland	GL-CL

Id	Subcategoría	Conversión
3B2biii	Wetlands converted to Cropland	WL-CL
3B2biv	Settlements converted to Cropland	SL-CL
3B2bv	Other Land converted to Cropland	OL-CL
3B3a	Grassland Remaining Grassland	GL-GL
3B3bi	Forest Land converted to Grassland	FL-GL
3B3bii	Cropland converted to Grassland	CL-GL
3B3biii	Wetlands converted to Grassland	WL-GL
3B3biv	Settlements converted to Grassland	SL-GL
3B3bv	Other Land converted to Grassland	OL-GL
3B4ai	Peatlands Remaining peatlands	WL-WL
3B4aii	Flooded land Remaining flooded land	WL-WL
3B4bi	Land converted for peat extraction	WL-WL
3B4bii	Land converted to flooded land	F-WL

Id	Subcategoría	Conversión
3B5a	Settlements Remaining Settlements	SL-SL
3B5bi	Forest Land converted to Settlements	FL-SL
3B5bii	Cropland converted to Settlements	CL-SL
3B5biii	Grassland converted to Settlements	GL-SL
3B5biv	Wetlands converted to Settlements	WL-SL
3B5bv	Other Land converted to Settlements	OL-SL
3B6a	Other Land Remaining Other Land	OL-OL
3B6bi	Forest Land converted to Other Land	FL-OL
3B6bii	Cropland converted to Other Land	CL-OL
3B6biii	Grassland converted to Other Land	GL-OL
3B6biv	Wetlands converted to Other Land	WL-OL
3B6bv	Settlements converted to Other Land	SL-OL

Nota. FL = tierras forestales; CL = tierras de cultivo; GL = pastizales; WL = humedales; SL = asentamientos; OL = otras tierras. Se conservan las denominaciones y equivalencias recibidas. La asignación 3B4bi = WL-WL requiere confirmación. Fuente: datos proporcionados por el PINCC-UNAM; organización para esta tesis.

Tabla B.2 Valores de carbono por conversión, ecorregión y reservorio

Conversión	Ecorregión I	Ecorregión II	BA	BS	MM	Man	COS	Unidades
FL-FL	Elevaciones Semiaridas Meridionales	Altiplanicie Mexicana	-0.14	-0.04	-	-	-	t C/ha
FL-FL	California Mediterranea	California Mediterranea	-0.05	-0.02	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Grandes Planicies	Cuerpos de agua	-	-	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Depresiones Intermontanas	0.44	0.14	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Desiertos de America del Norte	Desiertos Calidos	0.01	0.01	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Elevaciones Semiaridas Meridionales	Piedemonte de la Sierra Madre Occidental	0.17	0.06	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Grandes Planicies	Planicie costera de Texas-Louisiana	-0.07	-0.03	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Planicie Costera y Lomerios del Pacifico Sur	0.75	0.22	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Planicie Costera y Lomerios del Soconusco	-5.13	-1.44	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Planicie Costera y Lomerios Humedos del Golfo de Mexico	2.01	0.61	-	-	-	t C/ha

Conversión	Ecorregión I	Ecorregión II	BA	BS	MM	Man	COS	Unidades
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Planicie Costera, Lomerios y Canones del Occidente	0.19	0.05	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Planicie Noroccidental de la Peninsula de Yucatan	0.33	0.09	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Grandes Planicies	Planicie semiarida de Tamaulipas-Texas	0.07	0.03	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Planicie y Lomerios de la Peninsula de Yucatan	0.63	0.18	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Planicies Costeras y Lomerios Secos del Golfo de Mexico	0.46	0.15	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Planicies y Lomerios del Occidente	0.33	0.10	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Humedas	Sierra de Los Tuxtlas	10.70	3.92	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Sierras Templadas	Sierra Madre Centroamericana y Altos de Chiapas	1.87	0.54	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Sierras Templadas	Sierra Madre del Sur	0.93	0.27	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Sierras Templadas	Sierra Madre Occidental	0.12	0.04	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Sierras Templadas	Sierra Madre Oriental	0.61	0.18	-	-	-	t C/ha
FL-FL	Selvas Calidos-Secas	Sierra y Planicies de El Cabo	-0.02	-0.01	-	-	-	t C/ha

Conversión	Ecorregión I	Ecorregión II	BA	BS	MM	Man	COS	Unidades
FL-FL	Sierras Templadas	Sistema Neovolcanico Transversal	0.96	0.31	-	-	-	t C/ha

Nota. BA, BS, MM, Man y COS se conservan según la identificación recibida; verificar sus definiciones operativas antes de presentar la versión final. El guion indica valor no informado y no equivale a cero. Los signos y valores se transcribieron como fueron proporcionados. Fuente: datos proporcionados por el PINCC-UNAM; organización para esta tesis.

Tabla B.3 Serie anual de valores de carbono por conversión y ecorregión 2000 a 2019

Primer tramo 2000 a 2009

Conversión	Ecorregión I	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Unidades
FL-L	California Mediterranea	-0.01	-0.01	-0.01	-0.05	-0.01	-0.01	-0.00	-0.01	-0.01	-0.27	t C/ha
FL-L	Desiertos de America del Norte	-0.01	-0.01	-0.01	-0.05	-0.01	-0.01	-0.00	-0.01	-0.01	-0.27	t C/ha
FL-L	Grandes Planicies	-0.01	-0.01	-0.01	-0.05	-0.01	-0.01	-0.00	-0.01	-0.01	-0.27	t C/ha
FL-L	Elevaciones Semiaridas Meridionales	-0.01	-0.01	-0.01	-0.05	-0.01	-0.01	-0.00	-0.01	-0.01	-0.27	t C/ha
FL-L	Selvas Calido-Humedas	-0.05	-0.05	-0.07	-0.09	-0.08	-0.05	-0.11	-0.05	-0.08	-0.06	t C/ha
FL-L	Selvas Calido-Secas	-0.02	-0.02	-0.03	-0.04	-0.38	-0.02	-0.02	-0.03	-0.06	-0.02	t C/ha

Conversión	Ecorregión I	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Unidades
FL-L	Sierras Templadas	-0.04	-0.04	-0.03	-0.05	-0.04	-0.13	-0.06	-0.04	-0.04	-0.05	t C/ha
GL-L	California Mediterranea	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.55	-0.06	-0.21	-0.03	-0.05	-0.06	t C/ha
GL-L	Desiertos de America del Norte	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.55	-0.06	-0.21	-0.03	-0.05	-0.06	t C/ha
GL-L	Grandes Planicies	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.55	-0.06	-0.21	-0.03	-0.05	-0.06	t C/ha
GL-L	Elevaciones Semiaridas Meridionales	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.55	-0.06	-0.21	-0.03	-0.05	-0.06	t C/ha
GL-L	Selvas Calido-Humedas	-0.09	-0.09	-	-0.09	-0.09	-	-0.09	-0.13	-0.09	-0.31	t C/ha
GL-L	Selvas Calido-Secas	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.12	-0.10	-0.10	-0.10	-	t C/ha
GL-L	Sierras Templadas	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-	-0.20	-0.14	-	-0.08	-	t C/ha

Tabla B.3 Continuación 2010 a 2019

Conversión	Ecorregión I	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Unidades
FL-L	California Mediterranea	-0.01	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.01	-0.06	-0.06	-0.04	t C/ha
FL-L	Desiertos de America del Norte	-0.01	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.01	-0.06	-0.06	-0.04	t C/ha
FL-L	Grandes Planicies	-0.01	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.01	-0.06	-0.06	-0.04	t C/ha
FL-L	Elevaciones Semiaridas Meridionales	-0.01	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.01	-0.06	-0.06	-0.04	t C/ha
FL-L	Selvas Calido-Humedas	-0.07	-0.06	-0.06	-0.19	-0.12	-0.06	-0.08	-0.07	-0.07	-0.13	t C/ha
FL-L	Selvas Calido-Secas	-0.02	-0.04	-0.05	-0.04	-0.14	-0.04	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	t C/ha
FL-L	Sierras Templadas	-0.05	-0.04	-0.15	-0.15	-0.04	-0.04	-0.06	-0.06	-0.07	-0.19	t C/ha
GL-L	California Mediterranea	-0.13	-0.06	-0.12	-0.07	-0.05	-0.13	-0.45	-0.03	-0.01	-0.13	t C/ha
GL-L	Desiertos de America del Norte	-0.13	-0.06	-0.12	-0.07	-0.05	-0.13	-0.45	-0.03	-0.01	-0.13	t C/ha
GL-L	Grandes Planicies	-0.13	-0.06	-0.12	-0.07	-0.05	-0.13	-0.45	-0.03	-0.01	-0.13	t C/ha
GL-L	Elevaciones Semiaridas Meridionales	-0.13	-0.06	-0.12	-0.07	-0.05	-0.13	-0.45	-0.03	-0.01	-0.13	t C/ha

Conversión	Ecorregión l	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Unidades
GL-L	Selvas Calido-Humedas	-0.07	-0.10	-	-	-0.04	-0.10	-0.23	-0.11	-0.09	-0.09	t C/ha
GL-L	Selvas Calido-Secas	-0.10	-0.02	-0.09	-0.10	-0.00	-0.10	-0.06	-	-0.47	-0.10	t C/ha
GL-L	Sierras Templadas	-	-0.11	-0.03	-	-	-	-0.03	-1.00	-0.12	-0.11	t C/ha

Nota. FL-L y GL-L se conservan como códigos agregados recibidos; el destino específico incluido en "L" requiere confirmación. El guion indica dato no informado y no equivale a cero. Se preservan los signos negativos, incluidos los valores mostrados como −0.00 en el insumo. Fuente: datos proporcionados por el PINCC-UNAM; organización para esta tesis.

Anexo C Justificación de la homologación entre la Serie VII y GCAM

Las tablas siguientes documentan los criterios utilizados para asignar coberturas del conjunto de uso del suelo y vegetación de INEGI Serie VII a las categorías del modelo GCAM. Las descripciones se organizaron a partir del material de homologación de esta investigación. La asignación de dos tipos de matorral a rock and desert debe cotejarse con la matriz final, pues el apartado 3.6 también considera los matorrales en shrubs.

Tabla C.1 Coberturas asignadas a forest

Cobertura de la Serie VII	Criterio de homologación
Manglar	Constituye un ecosistema dominado por vegetación arbórea halófita con estructura forestal densa y permanente. Su composición leñosa y capacidad de almacenamiento de biomasa lo hacen funcionalmente equivalente a otros bosques tropicales costeros.
Mezquital tropical	Presenta dominancia de especies leñosas arbóreas, principalmente mezquites y otras especies xerotropicales, formando comunidades con cobertura arbórea continua.
Palmar inducido	Mantiene predominancia de vegetación arbórea tipo palma establecida por manejo humano, conservando estructura vertical y cobertura arbórea permanente.
Palmar natural	Está conformado por comunidades naturales dominadas por palmas arbóreas, con funciones ecológicas equivalentes a sistemas forestales tropicales abiertos.
Selva alta perennifolia	Corresponde a un ecosistema tropical con estrato arbóreo alto, denso y permanentemente verde, característico de bosques tropicales húmedos.
Selva alta subperennifolia	Mantiene predominancia arbórea tropical con pérdida parcial estacional de follaje, conservando estructura forestal consolidada.
Selva baja caducifolia	Aunque presenta menor altura, mantiene dominancia arbórea tropical y biomasa leñosa significativa.
Selva baja espinosa caducifolia	Está compuesta por vegetación arbórea tropical espinosa con estructura leñosa dominante.
Selva baja espinosa subperennifolia	Conserva predominancia arbórea tropical con especies espinosas adaptadas a climas secos.
Selva baja perennifolia	Presenta vegetación arbórea tropical permanente con cobertura forestal continua.
Selva baja subcaducifolia	Mantiene estructura arbórea tropical con pérdida parcial de hojas durante la temporada seca.
Selva baja subperennifolia	Presenta predominancia arbórea tropical con características intermedias de permanencia foliar.
Selva de galería	Corresponde a vegetación arbórea ribereña asociada a cuerpos de agua y corredores hidrológicos.

Cobertura de la Serie VII	Criterio de homologación
Selva mediana caducifolia	Mantiene dominancia de árboles tropicales de altura media con biomasa forestal relevante.
Selva mediana subcaducifolia	Conserva estructura arbórea tropical con caducidad parcial estacional.
Selva mediana subperennifolia	Presenta cobertura arbórea tropical semiperenne con estructura forestal definida.
Vegetación de Petén	Corresponde a una comunidad tropical húmeda dominada por vegetación arbórea adaptada a inundaciones estacionales.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de ayarín	Aunque corresponde a vegetación secundaria, mantiene predominancia del estrato arbóreo.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de cedro	Conserva cobertura arbórea secundaria derivada de ecosistemas forestales templados.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	Presenta regeneración arbórea dominante característica de bosques de Quercus.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	Mantiene dominancia arbórea secundaria mixta.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de galería	Conserva cobertura arbórea ribereña secundaria.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de mezquite	Mantiene predominancia de vegetación leñosa arbórea.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de oyamel	Conserva regeneración arbórea derivada de bosques templados de Abies.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	Mantiene estructura forestal secundaria dominada por coníferas.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	Presenta regeneración arbórea mixta característica de ecosistemas forestales templados.
Vegetación secundaria arbórea de bosque de táscate	Conserva predominancia arbórea secundaria de especies de Juniperus.
Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña	Mantiene estructura arbórea húmeda característica de bosques mesófilos.
Vegetación secundaria arbórea de manglar	Conserva cobertura arbórea halófita secundaria.

Cobertura de la Serie VII	Criterio de homologación
Vegetación secundaria arbórea de mezquital tropical	Mantiene predominancia de vegetación leñosa tropical secundaria.
Vegetación secundaria arbórea de palmar natural	Conserva cobertura arbórea secundaria dominada por palmas.
Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia	Mantiene regeneración arbórea tropical densa.
Vegetación secundaria arbórea de selva alta subperennifolia	Conserva estructura arbórea secundaria tropical.
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	Mantiene dominancia arbórea secundaria de selvas secas tropicales.
Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa caducifolia	Conserva cobertura arbórea tropical espinosa secundaria.
Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia	Presenta regeneración arbórea tropical espinosa.
Vegetación secundaria arbórea de selva baja perennifolia	Mantiene vegetación arbórea secundaria permanente.
Vegetación secundaria arbórea de selva baja subcaducifolia	Conserva cobertura arbórea tropical secundaria parcialmente caducifolia.
Vegetación secundaria arbórea de selva baja subperennifolia	Presenta regeneración arbórea tropical semiperenne.
Vegetación secundaria arbórea de selva de galería	Mantiene vegetación arbórea secundaria ribereña.
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana caducifolia	Conserva estructura arbórea tropical de altura media.
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subcaducifolia	Presenta regeneración arbórea tropical parcialmente caducifolia.
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	Mantiene cobertura arbórea tropical secundaria.

Cobertura de la Serie VII	Criterio de homologación
Vegetación secundaria arbórea de vegetación de Petén	Conserva predominancia arbórea en ambientes tropicales inundables.

Nota. La equivalencia se basa en la predominancia del estrato arbóreo, incluida la vegetación secundaria arbórea. Fuente: elaboración propia a partir de los criterios de homologación de esta investigación.

Tabla C.2 Coberturas registradas bajo rock and desert

Cobertura de la Serie VII	Criterio de homologación
Categoría desprovisto de vegetación	Corresponde a superficies dominadas por suelo desnudo, roca expuesta y ausencia significativa de cobertura vegetal.
Categoría sin vegetación aparente	Presenta ausencia o cobertura mínima de vegetación, característica típica de ambientes áridos y superficies desnudas.
Matorral desértico micrófilo	Corresponde a ecosistemas xerófilos de baja densidad vegetal desarrollados en zonas áridas y semiáridas.
Matorral desértico rosetófilo	Presenta vegetación adaptada a condiciones extremas de aridez, con importante presencia de suelo desnudo y roca.

Nota. Las asignaciones de matorral desértico micrófilo y matorral desértico rosetófilo están pendientes de cotejo con la matriz final de homologación y con la categoría shrubs descrita en el apartado 3.6. Fuente: elaboración propia a partir del material de homologación de esta investigación.

Tabla C.3 Cobertura herbácea asignada a grass and pasture

Cobertura de la Serie VII	Criterio de homologación
Popal	Corresponde a una comunidad hidrófila dominada por vegetación herbácea emergente y graminoides, con ausencia de estrato arbóreo dominante y funcionamiento ecológico equivalente a sistemas herbáceos húmedos.

Nota. El popal corresponde a vegetación herbácea hidrófila y se consigna bajo grass and pasture. Fuente: elaboración propia a partir del material de homologación de esta investigación.

ANEXO D. SUPERFICIE POR CATEGORÍA DE USO DEL SUELO EN LOS ESCENARIOS DE GCAM Y DIFERENCIAS RESPECTO AL ESCENARIO DE REFERENCIA EN 2050

Este anexo presenta los valores de superficie correspondientes al año 2050 para las categorías de uso del suelo (LandLeaf) de GCAM consideradas en el análisis. Los datos provienen de las corridas realizadas en el marco de los trabajos del Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) y constituyen los insumos empleados para la comparación transversal de los escenarios de cero emisiones netas 2050, 2055 y 2060 respecto al escenario de referencia.

El año 2050 se utiliza como horizonte común debido a que constituye el último año disponible para realizar una comparación simultánea de los cuatro escenarios sin incorporar diferencias derivadas de comparar distintos momentos temporales. Para los escenarios con meta de cero emisiones netas en 2055 y 2060, los valores de 2050 corresponden a puntos intermedios de sus respectivas trayectorias y no a sus años meta. La diferencia de superficie para cada categoría se calculó mediante:

$$\textit{Diferencia de superficie} = \textit{Superficie del escenario de mitigación} - \textit{Superficie del escenario de referencia}$$

donde *Diferencia de superficie* representa la diferencia de superficie de la categoría i en el escenario de mitigación s respecto al escenario de referencia en 2050; *Superficie del escenario de mitigación* corresponde a la superficie modelada de dicha categoría en el escenario de mitigación, y *Superficie del escenario de referencia* a su superficie en el escenario de referencia para el mismo año.

Los valores positivos indican que la superficie modelada de una categoría es mayor en el escenario de mitigación que en el escenario de referencia, mientras que los valores negativos indican una superficie menor. Estas diferencias representan cambios netos de superficie entre escenarios y no transiciones directas entre categorías de uso del suelo.

Tabla D.1. Superficie modelada y diferencia respecto al escenario de referencia por categoría de uso del suelo en 2050

Categoría GCAM	Referencia	Cero emisiones 2050	Diferencia	Cero emisiones 2055	Diferencia	Cero emisiones 2060	Diferencia
biomass	23.994	26.681	**+2.686**	25.193	**+1.199**	24.738	**+0.744**
crops	254.057	243.486	**−10.572**	244.837	**−9.221**	245.809	**−8.249**
forest (managed)	29.558	32.347	**+2.789**	32.308	**+2.750**	32.310	**+2.752**
forest (unmanaged)	426.889	446.864	**+19.975**	446.864	**+19.975**	446.843	**+19.954**
grass	86.011	89.256	**+3.245**	89.241	**+3.230**	89.213	**+3.202**
otherarable	90.744	90.396	**−0.348**	90.334	**−0.410**	90.178	**−0.566**
pasture (grazed)	358.218	325.461	**−32.757**	325.384	**−32.834**	325.234	**−32.984**
pasture (other)	283.279	276.214	**−7.066**	276.505	**−6.775**	276.322	**−6.958**
rock and desert	5.454	5.454	**0.000**	5.454	**0.000**	5.454	**0.000**
shrubs	371.284	393.331	**+22.047**	393.370	**+22.085**	393.388	**+22.104**
tundra	0.109	0.109	**0.000**	0.109	**0.000**	0.109	**0.000**
urban	6.732	6.732	**0.000**	6.732	**0.000**	6.732	**0.000**

Nota: Superficies y diferencias expresadas en miles de km². Las diferencias se calcularon como la superficie del escenario de mitigación menos la superficie del escenario de referencia para la misma categoría en 2050. Debido al redondeo, pueden presentarse diferencias menores en los últimos decimales.
Fuente: Elaboración propia con datos de las corridas de GCAM proporcionadas por el Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC).