

CUENTAS DE LOS **ECOSISTEMAS** **DE MÉXICO**



Resultados del Proyecto
**Natural Capital Accounting
and Valuation of Ecosystem
Services**
(NCAVES)





CUENTAS DE LOS **ECOSISTEMAS DE MÉXICO**



Resultados del Proyecto
**Natural Capital Accounting and
Valuation of Ecosystem Services**
(NCAVES)



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



System of
Environmental
Economic
Accounting



**United
Nations**



Funded by the European Union

El informe *Cuentas de los Ecosistemas de México. Resultados del Proyecto* Natural Capital Accounting and Valuation of Ecosystem Services (NCAVES) es parte de la implementación de las Cuentas de los Ecosistemas en México del INEGI.

Este informe es parte del proyecto NCAVES financiado por la Unión Europea (UE).

Exención de responsabilidad:

El contenido de este informe no refleja necesariamente los puntos de vista de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la UE u otros organismos involucrados. Las designaciones empleadas y la presentación de material, incluso en cualquier mapa de esta obra, no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la ONU o la UE sobre la situación jurídica de ningún país, territorio, ciudad o área o de sus autoridades, ni sobre la delimitación de sus fronteras.

Como citar este informe:

INEGI (2021). *Cuentas de los Ecosistemas de México. Resultados del Proyecto* Natural Capital Accounting and Valuation of Ecosystem Services (NCAVES). México, INEGI, 258 pp.

PREFACIO

En este informe se presentan los resultados del proyecto de Contabilidad de Capital Natural y de Valoración de Servicios Ecosistémicos (NCAVES, por sus siglas en inglés) derivados de los trabajos realizados durante la ejecución del estudio piloto para la compilación de las cuentas de ecosistemas, en el marco de la Contabilidad de los Ecosistemas del Sistema de Cuentas Ambientales y Económicas de las Naciones Unidas (SEEA EA, por sus siglas en inglés).

El proyecto NCAVES tiene como finalidad coadyuvar al conocimiento y a la integración de la biodiversidad y la contabilidad de ecosistemas de manera transversal, como sustento a la formulación y evaluación de políticas que incorporen el valor de la naturaleza en la toma de decisiones. El proyecto en México fue implementado bajo el liderazgo del **Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)**, en colaboración con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), y con el apoyo de la División de Estadísticas de las Naciones Unidas (UNSD, por sus siglas en inglés), el Programa de las Naciones Unidas para Medio Ambiente (PNUMA) y con el financiamiento de la Unión Europea.

México —junto con Brasil, China, India y Sudáfrica— forma parte de un selecto grupo de países identificados como estratégicos por la Unión Europea, en virtud de la importancia que tienen en términos de su patrimonio natural, manifiesta en la diversidad de ecosistemas y la variedad de formas biológicas, así como por su compromiso con el Convenio de la Diversidad Biológica (CDB).

Los resultados derivados del proyecto NCAVES se difunden bajo el título de *Cuentas de los Ecosistemas* por parte de estos cinco países piloto; nuestra nación no es la excepción, y al ser parte de la contabilidad ambiental que se elabora en el INEGI desde hace 30 años, también se denomina *Cuentas Ambientales de los Ecosistemas de México*.

El trabajo técnico y las discusiones llevadas a cabo en el marco de este proyecto dieron sustento al proceso multilateral de desarrollo del marco de la Contabilidad de Ecosistemas que culminó con la adopción del manual del SEEA EA, aprobado en marzo de 2021, durante la 52.^a Comisión de Estadística de las Naciones Unidas. El SEEA EA fue adoptado como un estándar estadístico internacional en sus capítulos referidos al marco contable y a las cuentas en términos físicos (capítulos 1-7), y principios y recomendaciones internacionales para la valoración monetaria de servicios y activos de los ecosistemas (capítulos 8-11).

El SEEA EA permite la integración de mediciones sobre las características y funciones de los ecosistemas y los servicios que estos brindan, con mediciones de las actividades económi-

cas y otras actividades humanas adoptando un enfoque sistemático que permite organizar la información sobre el tipo, tamaño y localización y condición de los ecosistemas y los servicios que estos proveen en términos físicos y monetarios. Las cuentas de ecosistemas utilizan como base de datos información geoespacial y económica, que se organizan conforme a una clasificación que es consistente con las clasificaciones del Sistema de Cuentas Nacionales.

Este informe presenta una visión general de los métodos utilizados, los retos afrontados, las soluciones implementadas y una descripción de los resultados obtenidos, además de un primer acercamiento de cómo los resultados del proyecto NCAVES se pueden insertar en el contexto institucional, identificando a los actores e instrumentos de política pública para los cuales la información que deriva de este proyecto puede ser relevante.

La estructura de este informe sigue el proceso llevado a cabo durante la compilación piloto de las Cuentas de los Ecosistemas de México: cuentas de extensión y condición de los ecosistemas, así como la contabilidad y valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas.

En la **cuenta de extensión** se muestran los datos sobre la ubicación geográfica y cobertura de los ecosistemas en el país. A través de cuentas de activos y matrices de cambio se registran las modificaciones que ocurrieron en cada tipo de ecosistema, incluyendo aquellos ocasionados por su conversión a espacios de uso de interés humano. Para ello, se tomó como base la información generada en las cartas de uso de suelo y vegetación del INEGI, reclasificándolas de acuerdo con las categorías CONAFOR-IPCC N3.

La **cuenta de condición** evalúa la composición, estructura y función de los ecosistemas, que dan sustento a su integridad ecológica. Esto se hizo a través del Índice de Integridad Ecosistémica (IIE), que utiliza información relacionada con el contexto biofísico en el que se desarrollan los ecosistemas, el grado de intervención humana y los atributos estructurales y funcionales de los organismos que viven en ellos. El IIE desarrollado en México se nutre de la información generada en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFYS) y de las zonas de vida de Holdridge, y constituye una propuesta de país para contribuir en las discusiones internacionales sobre la manera de abordar la medición de la condición de los ecosistemas.

Las alteraciones a la extensión y a la condición están estrechamente ligadas con la oferta de los servicios que brindan a la economía y a la sociedad en general, pues cada ecosistema es por naturaleza multifuncional y, en consecuencia, genera múltiples servicios.

La **valoración de los servicios ecosistémicos en términos monetarios** permite visibilizar la contribución de la naturaleza a las actividades económicas y al bienestar humano para el sustento de políticas públicas. Para este fin, fue necesario recurrir a diversas técnicas de valoración con la finalidad de estimar el valor de cambio de los servicios ecosistémicos considerados en este proyecto, conforme a las recomendaciones del SEEA EA, que son: provisión a la producción agrícola y cultivos seleccionados, regulación y almacenamiento de carbono, polinización, abastecimiento de agua a los hogares y turismo de naturaleza.

Una de las aportaciones de México a la discusión internacional para la valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas fue la estimación del valor del almacenamiento y secuestro de carbono como dos servicios diferenciados.

Los resultados obtenidos a nivel nacional permiten concluir que es posible implementar la contabilidad de los ecosistemas de acuerdo con los principios contables y metodológicos propuestos en el SEEA EA, considerando la disponibilidad de información y capacidades técnicas en México.

Es importante destacar que este trabajo sienta las bases para un proceso reflexivo y de discusión más amplio entre los sectores relevantes a nivel nacional, que deberá reforzarse mediante el establecimiento de mecanismos de coordinación que permitan las participaciones activa, transversal, institucional y formal de los sectores relevantes a través de órganos colegiados dentro del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG) que el INEGI está mandado a coordinar.

Desde luego, esto deberá acompañarse con la construcción de capacidades, la integración y armonización de los datos existentes, así como la generación regular de datos estadísticos y geográficos que sirvan como insumo para la compilación de cuentas de ecosistemas. Estas permiten la derivación de indicadores para dar seguimiento a los programas sectoriales y a los acuerdos internacionales, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el Marco Mundial de la Diversidad Biológica Post 2020.

Finalmente, se destaca la importancia de considerar este trabajo como un punto de partida para continuar analizando y extendiendo las temáticas planteadas en el presente documento. En este contexto, se está desarrollando un mapa de ruta para la institucionalización de las cuentas de ecosistemas en diferentes sectores, de acuerdo con las nuevas demandas que un sistema de esta naturaleza exige.

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ANP	áreas naturales protegidas
ANVCC	Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático
APF	Administración Pública Federal
BIOFIN	Iniciativa de Finanzas para la Biodiversidad
CDB	Convenio sobre la Diversidad Biológica
CE	Censos Económicos.
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CICC	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático
CIDR	Comisión Intersecretarial de Desarrollo Sustentable
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CNULD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los Países Afectados por Sequía Grave o Desertificación
COBIOCOM	Corredor Biocultural del Centro Occidente de México
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
CONAPO	Consejo Nacional de Población
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social
COP	Conferencia de las Partes
COTECOCA	Comisión Técnico Consultivo de Coeficientes de Agostadero
CPEUM	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
CTDA	Costos Totales por Agotamiento y Degradación Ambiental
DGACN	Dirección General Adjunta de Cuentas Nacionales
DGARNMA	Dirección General Adjunta de Recursos Naturales y Medio Ambiente

DGEE	Dirección General de Estadísticas Económicas (del INEGI)
DGGMA	Dirección General de Geografía y Medio Ambiente (del INEGI)
DOF	Diario Oficial de la Federación
ENA	Encuesta Nacional Agropecuaria
ENBIOMEX	Estrategia Nacional de Biodiversidad de México
ENCC	Estrategia Nacional de Cambio Climático
UE	Unión Europea
FONDEN	Fondo de Desastres Naturales
GIZ	Cooperación Alemana para el Desarrollo Sustentable
GPA	Gasto en Protección Ambiental
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPBES	Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LDRS	Ley de Desarrollo Rural Sustentable
LFRA	Ley Federal de Responsabilidad Ambiental
LGAHOTDU	Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano
LGCC	Ley General de Cambio Climático
LGDFS	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LGVS	Ley General de Vida Silvestre
NCAVES	Contabilidad de Capital Natural y Valoración de Servicios Ecosistémicos
NDC	Contribución Nacionalmente Determinada
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OET	Ordenamiento Ecológico del Territorio
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PIB	Producto Interno Bruto
PND	Plan Nacional de Desarrollo
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PROCAMPO	Programa de Apoyos Directos al Campo
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PSA	Pago por Servicios Ambientales
RHA	Región Hidrológica Administrativa

SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SCIAN	Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte
SCN	Sistema de Cuentas Nacionales
SCUSV	Sistema de Clasificación de Uso del Suelo y Vegetación (del INEGI)
SE	servicios de los ecosistemas
SECTUR	Secretaría de Turismo
SEDATU	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
SEEA CF	Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica 2012 Marco Central (<i>System of Environmental-Economic Accounting 2012 Central Framework</i>)
SEEA EA	Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica-Contabilidad de los Ecosistemas (<i>System of Environmental-Economic Accounting Ecosystem Accounting</i>)
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SINA	Sistema Nacional de Información del Agua
SINAREFI	Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura
SIODS	Sistema de Información de los Objetivos de Desarrollo Sostenible
SMN	Sistema Meteorológico Nacional
SNA (SCN)	Sistema de Cuentas Nacionales
SNIARN	Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales
SNIB	Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad
SNIEG	Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica
SNIGF	Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal
SUN	Sistema Urbano Nacional
TEEB	<i>The Economics of Ecosystems and Biodiversity</i>
UMA	Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre
UNSD	División de Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas

CONTENIDO

3	■ ■ ■	Prefacio
6	■ ■ ■	Siglas y acrónimos
14	■ ■ ■	1 Introducción
15	■ ■ ■	1.1 Acerca del proyecto NCAVES
16	■ ■ ■	1.2 Implementación nacional del proyecto NCAVES
18	■ ■ ■	2 Contexto nacional
18	■ ■ ■	2.1 Contexto geográfico, ambiental, social y económico
21	■ ■ ■	2.1.1 Factores de presión
23	■ ■ ■	2.2 Contexto institucional
23	■ ■ ■	2.2.1 Instrumentos legales
25	■ ■ ■	2.2.2 Compromisos internacionales
26	■ ■ ■	2.2.3 Instrumentos de política de la Administración Pública Federal
29	■ ■ ■	2.2.4 Sistemas de información y actores clave en el marco del proyecto NCAVES
34	■ ■ ■	3 El Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SEEA)
35	■ ■ ■	3.1 El SEEA en el mundo
37	■ ■ ■	3.2 Situación de la contabilidad ambiental y económica en México
37	■ ■ ■	3.3 La contabilidad de los ecosistemas del SEEA
38	■ ■ ■	3.3.1 Enfoque conceptual de la contabilidad de ecosistemas del SEEA
39	■ ■ ■	3.3.2 Las cuentas de los ecosistemas
42	■ ■ ■	4 Cuentas de extensión de los ecosistemas terrestres en México
43	■ ■ ■	4.1 Introducción
44	■ ■ ■	4.2 Clasificación de los ecosistemas en México
45	■ ■ ■	4.2.1 Sistema de clasificación de la vegetación en México
46	■ ■ ■	4.2.2 Correspondencia entre sistemas de clasificación de los ecosistemas
47	■ ■ ■	4.3 Metodología
47	■ ■ ■	4.3.1 Insumos cartográficos

49 ■ ■ ■	4.3.2 Contabilidad de la extensión de ecosistemas y sus cambios
50 ■ ■ ■	4.3.3 Matrices de cambio
52 ■ ■ ■	4.4 Resultados
52 ■ ■ ■	4.4.1 Extensión de los ecosistemas terrestres en México
55 ■ ■ ■	4.4.2 Cambios en la extensión de los ecosistemas
60 ■ ■ ■	4.4.3 Vegetación potencial
61 ■ ■ ■	4.4.4 Matrices de cambio
65 ■ ■ ■	4.5 Discusión
66 ■ ■ ■	4.6 Conclusiones
67 ■ ■ ■	4.6.1 Áreas de oportunidad y recomendaciones
69 ■ ■ ■	5 Cuentas de condición de los ecosistemas terrestres de México
71 ■ ■ ■	5.1 Introducción
72 ■ ■ ■	5.2 Antecedentes
75 ■ ■ ■	5.3 Método
75 ■ ■ ■	5.3.1 Etapas para la evaluación de la condición de ecosistemas
88 ■ ■ ■	5.3.2 Extensión efectiva e Índice de Capital Natural
90 ■ ■ ■	5.4 Resultados
90 ■ ■ ■	5.4.1 Etapa 1. Contabilidad de las variables de la condición de los ecosistemas
92 ■ ■ ■	5.4.2 Etapa 3. Medida agregada de la condición del ecosistema
97 ■ ■ ■	5.4.3 Extensión efectiva de los ecosistemas e Índice de Capital Natural
102 ■ ■ ■	5.4.4 Relación entre los índices de Integridad Ecosistémica y de Huella Humana, así como con las categorías primaria y secundaria de vegetación
108 ■ ■ ■	5.5 Discusión
109 ■ ■ ■	5.6 Conclusiones
109 ■ ■ ■	5.6.1 Relevancia de la cuenta de condición para la toma de decisiones
110 ■ ■ ■	5.6.2 Áreas de oportunidad y limitaciones
112 ■ ■ ■	6 Contabilidad y valoración de los servicios de los ecosistemas
112 ■ ■ ■	6.1 Introducción a los servicios de los ecosistemas
114 ■ ■ ■	6.1.1 Clasificación de servicios de los ecosistemas
115 ■ ■ ■	6.1.2 Métodos de valoración monetaria de los servicios y activos de los ecosistemas
118 ■ ■ ■	6.2 Provisión de los servicios de los ecosistemas a la producción agrícola y cultivos seleccionados

119 ■■■	6.2.1 Introducción
119 ■■■	6.2.2 Hechos estilizados
121 ■■■	6.2.3 Datos y métodos
128 ■■■	6.2.4 Resultados
152 ■■■	6.2.5 Discusión
154 ■■■	6.3 Servicio de regulación del almacenamiento y secuestro de carbono (en biomasa y suelo)
155 ■■■	6.3.1 Introducción
156 ■■■	6.3.2 Datos y métodos
159 ■■■	6.3.3 Resultados
170 ■■■	6.3.4 Discusión
172 ■■■	6.4 Servicio de polinización
173 ■■■	6.4.1 Introducción
174 ■■■	6.4.2 Datos y métodos
178 ■■■	6.4.3 Resultados
187 ■■■	6.4.4 Conclusiones y comentarios generales
190 ■■■	6.5 Servicio de provisión y regulación del abastecimiento de agua
191 ■■■	6.5.1 Introducción
191 ■■■	6.5.2 Hechos estilizados y flujos físicos en recursos hídricos
194 ■■■	6.5.3 Datos y métodos
198 ■■■	6.5.4 Resultados
206 ■■■	6.5.5 Conclusiones y recomendaciones
208 ■■■	6.6 Servicios culturales en la economía del turismo de naturaleza
208 ■■■	6.6.1 Introducción
209 ■■■	6.6.2 Hechos estilizados
211 ■■■	6.6.3 Datos y métodos
213 ■■■	6.6.4 Resultados
217 ■■■	6.6.5 Conclusiones y comentarios generales
218 ■■■	6.7 Valoración monetaria agregada de los servicios de los ecosistemas
219 ■■■	6.7.1 Introducción
219 ■■■	6.7.2 Resultados
223 ■■■	6.7.3 Cuadros de oferta y utilización de los servicios de los ecosistemas en México
226 ■■■	6.8 Conclusiones y recomendaciones

228 ■ ■ ■	7 Conclusiones
229 ■ ■ ■	7.1 Principales resultados de las cuentas piloto de los ecosistemas
229 ■ ■ ■	7.1.1 Cuentas de extensión
230 ■ ■ ■	7.1.2 Cuentas de condición
231 ■ ■ ■	7.1.3 Valoración económica de los servicios de los ecosistemas
236 ■ ■ ■	7.2 Próximas etapas: hacia la implementación de una contabilidad integrada
236 ■ ■ ■	7.2.1 Disponibilidad e interoperabilidad de datos
238 ■ ■ ■	7.2.2 Consolidación e integración de las cuentas
238 ■ ■ ■	7.2.3 Canasta de servicios ecosistémicos y otras cuentas
239 ■ ■ ■	7.2.4 Expansión y fortalecimiento de los grupos de trabajo
239 ■ ■ ■	7.2.5 Fortalecimiento de capacidades, coordinación y colaboración institucional
240 ■ ■ ■	7.2.6 Integración institucional
243 ■ ■ ■	8 Referencias
252 ■ ■ ■	9 Anexos
252 ■ ■ ■	9.1 Clasificación de los ecosistemas terrestres en México y su correspondencia con otras clasificaciones
255 ■ ■ ■	9.2 Propuesta para la interoperabilidad de la información ecológica disponible en México en el marco del proyecto NCAVES
256 ■ ■ ■	9.2.1 Redes bayesianas
257 ■ ■ ■	9.2.2 Modelación de interacciones entre datos socio-ecológicos
259 ■ ■ ■	9.2.3 Patrones de asociación entre las categorías mapeadas
261 ■ ■ ■	9.2.4 Inferencias a partir de la red bayesiana
263 ■ ■ ■	9.2.5 Interoperabilidad de los datos socio-ecológicos
268 ■ ■ ■	9.3 Análisis de cambios en la extensión de los ecosistemas a nivel nacional por periodos intermedios
272 ■ ■ ■	9.4 Contabilidad de la extensión de ecosistemas terrestres en México a nivel subnacional (ecorregiones, áreas naturales protegidas, estados de la República Mexicana)
272 ■ ■ ■	9.4.1 Extensión de ecosistemas en las áreas naturales protegidas en México
274 ■ ■ ■	9.4.2 Extensión de ecosistemas en los estados de la República Mexicana
275 ■ ■ ■	9.4.3 Extensión de ecosistemas en las ecorregiones terrestres de México
277 ■ ■ ■	9.5 Cuadros detallados

277 ■ ■ ■	9.5.1 Servicios de los ecosistemas y sus beneficios en las actividades económicas y humanas
282 ■ ■ ■	9.6 Glosario

1 Introducción

México, al igual que muchos países del mundo, enfrenta el reto de atender numerosos problemas relacionados con el medio ambiente, que en el futuro inmediato podrían constituir un serio obstáculo para continuar con su desarrollo económico y alcanzar la sustentabilidad. La pérdida y degradación de los ecosistemas y de la biodiversidad, la disponibilidad y calidad del agua, la contaminación del medio ambiente y la necesidad de adaptación a los efectos del cambio climático son algunos de los problemas más importantes que afectan el bienestar de la población (SEMARNAT, 2019).

El desarrollo económico, medido a través del Producto Interno Bruto (PIB), ha dominado la discusión en políticas públicas, dejando en un rango inferior el estado o situación de los recursos naturales y los ecosistemas que proporcionan los servicios que hacen posible la vida en la biósfera y el desarrollo humano.

Para visibilizar en la agenda pública esta disyuntiva y poner al mismo nivel las discusiones de políticas económica y ambiental, es necesario contar con un enfoque que permita integrar la información económica y ambiental, así como dar respuesta a preguntas como: ¿cuál es la contribución de los ecosistemas y sus servicios a la economía, al bienestar social, al empleo y a los medios de vida?, ¿cómo ha cambiado la condición, salud e integridad de los ecosistemas y la biodiversidad con el tiempo?, ¿dónde están las principales áreas de degradación y recuperación?, ¿es posible administrar mejor los recursos naturales y los ecosistemas para garantizar servicios y beneficios continuos, como: el suministro de alimentos, provisión de agua, control de inundaciones, almacenamiento de carbono y oportunidades recreativas?, ¿qué se pierde o gana por los cambios de los usos del suelo (por ejemplo, para la agricultura, la minería, el desarrollo de viviendas, la conservación del hábitat, la recreación)? y ¿cómo se puede lograr un equilibrio para lograr la sostenibilidad y la equidad a largo plazo?

La contabilidad de los servicios ecosistémicos busca dar respuesta a estas preguntas integrando y organizando datos biofísicos complejos para poder entender los cambios y las transformaciones en los ecosistemas y su relación con las actividades humanas, en particular de índole económica, utilizando principios contables y cuentas estandarizadas. Se espera que esta base de conocimiento brinde más información para el diseño, la adopción y el seguimiento de políticas públicas que permitan hacer frente a la crisis ambiental que amenaza nuestro presente y compromete nuestro futuro.

1.1 Acerca del proyecto NCAVES

La División de Estadística de las Naciones Unidas (UNSD, por sus siglas en inglés) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en colaboración con la Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), comenzaron en 2017 la implementación del proyecto de Contabilidad de Capital Natural y Valoración de Servicios de los Ecosistemas (NCAVES, por sus siglas en inglés).

El proyecto ha sido financiado a nivel global por la Unión Europea mediante su *Instrumento de Asociación (Partnership Instrument)* para la cooperación con otros países, y tiene el objetivo de impulsar el conocimiento y la aplicación de la contabilidad económico-ambiental, en particular la contabilidad de capital natural y la valoración de los servicios de los ecosistemas, en cinco países estratégicos: Brasil, China, India, México y Sudáfrica. El proyecto plantea el desarrollo de pruebas piloto del marco de Contabilidad de los Ecosistemas del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económico (SEEA EA, por sus siglas en inglés) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) con el fin de:

- Mejorar la medición de los ecosistemas y sus servicios, en términos físicos y monetarios, a nivel nacional o subnacional.
- Incorporar, de manera transversal, la biodiversidad y los ecosistemas como fundamentos para la formulación e implementación de política pública a nivel nacional o subnacional.
- Contribuir al desarrollo de una metodología internacionalmente aceptada y su aplicación en los países.

El proyecto fue organizado en diferentes líneas de trabajo que incluyen:

- La **compilación de cuentas de los ecosistemas**, en términos físicos y monetarios, la cual se ha llevado a cabo mediante ejercicios piloto de contabilidad de ecosistemas en los cinco países participantes en el proyecto.
- El uso y aplicación de las cuentas de ecosistemas piloto mediante el **análisis de escenarios** basado en políticas nacionales o subnacionales prioritarias.
- La **elaboración de directrices y métodos** para coadyuvar a la implementación nacional y mundial de la contabilidad de capital natural.
- El desarrollo y pruebas de un grupo de **indicadores** en el contexto de la agenda Post-2020 para la biodiversidad y otras iniciativas internacionales.
- La contribución a la armonización entre el SEEA y la **contabilidad empresarial**.
- Actividades de **comunicación y difusión** para fomentar la concientización y demostrar el valor de la contabilidad de capital natural tanto en los países piloto como a nivel mundial mediante el desarrollo de varios productos de comunicación.

- El **desarrollo de las capacidades técnicas** y el **intercambio de conocimiento** mediante el desarrollo de cursos en línea y talleres de capacitación (nacionales y regionales) que contribuyan a expandir la comunidad de expertos en contabilidad de capital natural.

En paralelo, el proyecto tiene el objetivo de establecer o fortalecer mecanismos de coordinación interinstitucionales para fomentar el desarrollo y uso de la contabilidad de capital natural en los países piloto mediante un análisis de la situación en cada país, lo cual servirá como insumo para el desarrollo de una hoja de ruta para la implementación de las cuentas de ecosistemas en cada país.

1.2 Implementación nacional del proyecto NCAVES

En México, el proyecto NCAVES comenzó a operar en junio de 2017. Su implementación en nuestro país está a cargo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en colaboración de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y de otras dependencias del sector ambiental y la Academia. El proyecto busca aprovechar los avances y resultados derivados del proyecto *Advancing Natural Capital Accounting (ANCA)* de 2014 a 2016, financiado por el gobierno Noruego, en el que también participó México como país piloto.

En México, el INEGI tiene una posición importante como institución impulsora del proyecto NCAVES, ya que es la institución responsable de coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG) y de generar la información estadística y geográfica en el país.

En el seno del INEGI, el proyecto NCAVES se coordina e implementa bajo el liderazgo de la Dirección General de Estadísticas Económicas (DGEE), en colaboración con la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente (DGGMA).

El mandato de la DGEE incluye la organización, procesamiento, integración y compilación del Sistema de Cuentas Nacionales, el cual incluye las Cuentas Satélite. Por su parte, el de la DGGMA incluye la producción y actualización de información geográfica digital de recursos naturales y medio ambiente, así como la conformación del inventario de recursos naturales del país. La coordinación ejecutiva del proyecto NCAVES queda a cargo de la Vicepresidencia de Información Económica (VPIE), con el apoyo de la Vicepresidencia de Información Geográfica y Medio Ambiente, Ordenamiento Territorial y Urbano (VPIGMAOTU).

Un proyecto de la naturaleza multidisciplinaria como el NCAVES requiere la coordinación de diferentes actores para lograr la integración de información geográfica, económica, ecológica y ambiental necesaria para la elaboración de las cuentas de ecosistemas.

En México, la SEMARNAT tiene un papel central en el desarrollo del proyecto NCAVES al ser la dependencia del gobierno mexicano que tiene como propósito fundamental constituir una política de Estado para la protección ambiental que preserve y restaure el equilibrio ecológico y sienta las bases para un desarrollo sustentable en el país.

El sector ambiental mexicano, encabezado por la SEMARNAT, lo integran la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Agencia de Seguridad, Energía y Medio Ambiente (ASEA).

La participación de la SEMARNAT en este proyecto se lleva cabo a través de la Dirección General de Estadística e Información Ambiental (DGEIA) y de la Dirección General de Planeación y Evaluación (DGPE), ambas dependientes de la Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental. La DGEIA es responsable del desarrollo y mantenimiento del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN), que integra estadísticas e indicadores ambientales, así como información geoespacial, que no solo son la base de información con la que el sector ambiental realiza actividades de seguimiento, planeación y evaluación, sino también sirven para informar sobre la situación del medio ambiente. Por su parte, la DGPE es la responsable de establecer y coordinar las políticas y lineamientos de la planeación y mejora institucional, así como de supervisar el cumplimiento de los objetivos, políticas, estrategias y metas del programa de gobierno del sector ambiental en México.

Durante el proyecto, la SEMARNAT ha acompañado el desarrollo de las cuentas de ecosistemas, no solo como usuario de la información, sino también proporcionando apoyo y opinión experta para la elaboración de algunas cuentas piloto.

El sector ambiental, como principal usuario de la información de la contabilidad de ecosistemas, también ha acompañado, a nivel técnico, el desarrollo de este proyecto piloto como parte del Grupo Técnico Interinstitucional, que fue constituido como parte del proyecto precedente (ANCA) para proveer información relevante para el avance del conocimiento, medición y valoración de los ecosistemas en México.

2 Contexto nacional

En este apartado se presenta una visión general que sirva de base para entender: a) las condiciones geográficas, ambientales y socioeconómicas que determinan el estado de los ecosistemas, así como el uso de servicios ecosistémicos; b) los principales factores de presión a los ecosistemas, los cuales se relacionan de manera directa con los cambios analizados en las cuentas de extensión y condición; y c) el marco institucional y la forma en la que los resultados del proyecto NCAVES aportan elementos para una mejor toma de decisiones a nivel nacional.

2.1 Contexto geográfico, ambiental, social y económico

México posee una superficie continental de 1 960 189 km² y una marítima (mar territorial y la Zona Económica Exclusiva) de 3 149 920 km², mientras que la plataforma continental extendida en el polígono occidental del Golfo de México es de 10 570 km², lo cual conforma una superficie total de 5 120 679 km² (INEGI, 2020). Asimismo, la línea de costa, de acuerdo con el INEGI, es de 11 122 km, de la cual 7 828 km corresponden al océano Pacífico y 3 294 km, al Golfo de México y Mar Caribe. La ubicación y la orografía de México explican la variedad de climas existentes en el país, los cuales van desde cálidos húmedos, subhúmedos, templados hasta secos y fríos alpinos, con precipitaciones que van de los 100 a 300 mm en las zonas más secas hasta los 1 000 y 4 000 mm en las más húmedas (INECC, 2018).

Con respecto a la biodiversidad, se considera que México es uno de los 17 países megadiversos del mundo. La CONABIO sugiere que esto se debe a sus características, como: la posición geográfica, el tamaño, la historia evolutiva, la diversidad de paisajes y la cultura. Tan solo en México se han definido 96 ecorregiones terrestres (sin considerar islas) y 28 marinas. (Sarukhán 2009, Sarukhán *et al.*, 2017; CONABIO, 2020). También, se destaca como la cuarta nación en cuanto a riqueza de especies a nivel mundial, pues alberga entre 10 y 12 % de las especies conocidas (Sarukhán *et al.*, 2017). Asimismo, está entre los cinco países con mayor diversidad en cuatro grupos de vertebrados (mamíferos, aves, reptiles y anfibios), así como de especies endémicas de estos grupos. Además, ocupa el segundo lugar a nivel mundial en diversidad de especies de reptiles (después de Australia) y el primero de mamíferos marinos. También, se encuentra entre los cuatro países con el mayor número de plantas vasculares. No

obstante, algunos disturbios relacionados con la pérdida y fragmentación de ecosistemas son un factor de riesgo para la conservación de la diversidad de especies.¹

México es uno de los ocho principales centros de origen, domesticación y diversidad genética de más de 130 especies de plantas, de las cuales 25 tienen uso comercial en todo el mundo y son la base para la alimentación humana y animal en cientos de países. (Acevedo *et al.*, 2009). Entre estas especies destacan el maíz (*Zea mays*), del que se han identificado y descrito 64 razas en México, así como el frijol, el chile, la calabaza, el cacao y el jitomate, entre otras. Con respecto al conocimiento de la diversidad genética, de acuerdo con el *Informe de la situación del medio ambiente en México*, hasta hace una década se habían descrito alrededor de 200 especies de diferentes géneros y familias en el país (SEMARNAT, 2019).

Otro aspecto relevante es la distribución de suelos. El INEGI reporta que en México se presentan 25 de las 32 unidades de suelo reconocidas en la clasificación de la Base Referencial Mundial (WRB, por sus siglas en inglés), lo cual constituye una gran riqueza edáfica. De acuerdo con una evaluación desarrollada en 2002, 44.9 % de los suelos estaba afectado por algún proceso de degradación química, erosión hídrica, eólica y física. Del total de suelos degradados, 77.4 % de la superficie estaba asociada a actividades agrícolas y pecuarias, seguida por deforestación y remoción de la vegetación (16.4 %); el resto de la superficie degradada se asocia con procesos de urbanización, sobreexplotación de vegetación y actividades industriales (SEMARNAT y UACH, 2003).

En lo referente a las condiciones hídricas del país, la CONAGUA estimó que la precipitación promedio anual en años recientes es de alrededor de 1 450.5 km³ de agua. De estos, 72.1 % se evapotranspira, 21.4 % escurre por ríos y arroyos y el restante 6.4 % se infiltra y recarga los acuíferos. El agua dulce renovable per cápita por año está en función tanto de las condiciones hídricas como de la población. México cuenta con 451 585 millones de m³ de agua dulce renovable al año, lo cual significó, en 2017, un promedio nacional de 3 656 m³/hab./día, con distribución variable entre las distintas regiones del país. En lo referente a los usos consuntivos del agua en 2017, 60.9 % del volumen de agua concesionada provino de fuentes superficiales y 39.1 %, de aguas subterráneas. El 76.0 % se destinó a las actividades agrícolas; 14.4 %, al abastecimiento público; 4.9 %, a la industria autoabastecida; y 4.7 %, a la energía eléctrica, excluyendo la hidroelectricidad (CONAGUA, 2018).

Con respecto a la población, de acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2021), en México hay 126.014 millones de personas, de las cuales 51.2 % son mujeres y 48.8 %, hombres, y la densidad poblacional fue de 64.3 hab./km²; la población aumentó en 13.67 millones de habitantes entre 2010 y 2020, lo que presenta una tasa de crecimiento media anual de 1.2 % para este periodo.

¹ De acuerdo con la *Norma Oficial Mexicana NOM-059* sobre categorías de especies en riesgo, en México hay 48 especies extintas en el medio silvestre, 535 en peligro de extinción, 912 amenazadas y 1 183 sujetas a protección especial.

De acuerdo con el Sistema de Cuentas Nacionales de México (INEGI, 2021), en 2019, el Producto Interno Bruto (PIB) total a precios básicos fue de 24 453 868 millones de pesos corrientes; este se distribuyó de la siguiente manera:

- Las actividades primarias contribuyeron con 3.4 % del PIB (829 860 millones de pesos), de los cuales 2.2 % del total se debió a la agricultura; la cría y explotación de animales, con 1 %; el aprovechamiento forestal, con 0.1 %; y la pesca, caza y captura, con 0.1 % del PIB. Los servicios relacionados con estas actividades participaron con 0.01 % del Producto Interno Bruto.
- Las actividades secundarias contribuyeron con 30.9 % del PIB total a precios básicos. La minería aportó 4.3 % (extracción de petróleo y gas; minería de minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas; así como servicios relacionados con la minería). La generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final aportó 2.2 %; la construcción, 7.1 %; y las industrias manufactureras contribuyeron con 17.3 por ciento.
- Las actividades terciarias aportaron 52.9 % del PIB total a precios básicos en 2019 y de estas, el comercio al por mayor significó 9.2 %; el comercio al por menor, 9.4 %; transportes, correos y almacenamiento, 6.2 %; información en medios masivos, 1.5 %; servicios financieros y seguros, 4 %; servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles, 9.7 %; servicios profesionales, científicos y técnicos, 1.8 %; corporativos, 0.6 %; servicios de apoyo a los negocios y manejo de residuos y desechos y servicios de remediación, 3.4 %; servicios educativos, 3.6 %; servicios de salud y de asistencia social, 2.3 %; servicios de esparcimiento culturales y deportivos y otros servicios recreativos, 0.4 %; servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas, 2.3 %; otros servicios excepto actividades gubernamentales, 1.9 %; y actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales, 3.6 por ciento.

Las Cuentas Económicas y Ecológicas de México (CEEM) permiten estimar el impacto de las actividades económicas en el agotamiento de los recursos naturales y la degradación del medio ambiente. De acuerdo con el cálculo del INEGI para 2019, los Costos Totales por Agotamiento y Degradación Ambiental (CTADA) fueron equivalentes a 4.5 % del PIB. Por otra parte, los Gastos en Protección Ambiental (GPA) del gobierno general representaron 0.5 % del PIB a precios básicos del mismo año; este indicador representa el esfuerzo realizado para la medición, control, disminución y abatimiento de la contaminación, así como para la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales (INEGI, 2020).

2.1.1 Factores de presión

La presión a los recursos naturales y los servicios ecosistémicos se vincula con los procesos regionales de ocupación del territorio y crecimiento de la población. Destacan las entidades del centro del país; tan solo el estado de México y la Ciudad de México concentraron 20 % de toda la población en 2020 (13.5 y 7.3 %, respectivamente). Sobre las regiones con mayor ritmo de crecimiento sobresalen la península de Baja California, la cual tiene ligado su crecimiento a la ciudad fronteriza de Tijuana y a las actividades alrededor de los polos turísticos de La Paz y Los Cabos. Por su parte, en la península de Yucatán destaca Quintana Roo, donde existen 40 % más de personas con respecto a las que había en 2010. Aunque Campeche y Yucatán no aumentaron al mismo ritmo, entre los tres estados de la península, en 2020, sumaron 1 millón de personas más de las que había en 2010 (INEGI, 2011 y 2021).

2.1.1.1 Cambio de uso de suelo

De acuerdo con la SEMARNAT (2019), los principales procesos de cambio de uso de suelo son la deforestación, alteración o degradación y fragmentación. La desertificación ha afectado 53.5 % de los recursos bióticos en el territorio nacional; 65.3 % de los edáficos han sido dañados con procesos de ligero a extremo y 63 % de los hídricos del territorio han sido afectados con algún nivel de degradación (SEMARNAT, 2019).

Otro de los principales procesos que afectan las condiciones de los ecosistemas es el que tiene que ver con los impactos de la urbanización. Como se puede observar en el *Capítulo 4*, los asentamientos humanos representaron solo 1.11 % del territorio en 2014, pero al pasar de 12 657 km² en 2002 a 21 798 km² en 2014, implicó un aumento de 72.2 por ciento. De acuerdo con el censo del INEGI (2020), solo 21.4 % de las personas habita en localidades menores a 2 500 habitantes, es decir, 78.6 % de la población vive en áreas urbanas y, específicamente, casi la mitad, en localidades de más de 100 mil habitantes. La expansión de los asentamientos humanos no solo afecta a los ecosistemas en lo referente al cambio de uso de suelo en zonas circundantes, sino también impacta en la demanda de servicios ecosistémicos, en la generación de contaminación y la construcción de infraestructura (SEMARNAT, SEDATU y GIZ, 2016; SEMARNAT, 2019).

2.1.1.2 Cambio climático y eventos extremos

En la Sexta Comunicación Nacional de Cambio Climático,² el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2018) señala que, por sus condiciones geográficas, el país se ve afectado de manera particular por los efectos del cambio climático y estima que para el periodo de 2015 a 2039 (teniendo como lapso de referencia 1961-2000), los escenarios climáticos (RCP 8.5) proyectan aumentos de temperatura de hasta 2 °C en el norte del país, mientras que la mayoría de estos incrementos van 1 a 1.5 °C, en la que los ecosistemas más afectados serán los bosques templados de montaña (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 1998) e incluso traerán afectaciones en los procesos productivos de algunas especies, entre ellas, el café cultivado en alta montaña (Villers *et al.*, 2009). Además, menciona que la precipitación podría tener una disminución de entre 10 y 20 por ciento. Más de 60 % del territorio nacional es impactado por fenómenos hidrometeorológicos y ciclones tropicales; por ejemplo, entre 1970 y 2017, las costas de México fueron impactadas por 269 ciclones. En las últimas décadas se han presentado periodos de sequía severa, destacando, por ejemplo, que en mayo de 2011 más de 90 % del territorio fue afectado por la sequía y su recurrencia puede agravar las condiciones de estrés ambiental y afectar el entorno social y económico (INECC, 2018). En lo referente a los incendios forestales, de acuerdo con datos de la CONAFOR, entre 1991 y 2017, el promedio anual fue de 8 094 eventos y una superficie siniestrada promedio de 284 mil hectáreas (SEMARNAT, 2019). La principal causa de los incendios fueron actividades agropecuarias (39 %). Con respecto a las plagas y enfermedades forestales, entre 1990 y 2017, la superficie anual afectada promedio fue de 56 227 hectáreas. En síntesis, y como lo señala la SEMARNAT (2019), el impacto del cambio climático y los eventos meteorológicos extremos están relacionados con la modificación de la distribución, el reemplazo de ecosistemas, la degradación y la modificación en la composición de especies, así como la presencia de plagas y enfermedades. Todos estos cambios afectan también las especies necesarias para la seguridad alimentaria, incluyendo la producción tanto agropecuaria como pesquera.

2 La Sexta Comunicación Nacional de Cambio Climático fue preparada en 2018 por el gobierno de México a través de la SEMARNAT y el INECC, y presentada ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El documento incluye los avances del país en la transición hacia una economía baja en carbono, la estimación de los costos de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas de México, la relación entre cambio climático, contaminación, salud, los co-beneficios de la mitigación de los forzantes climáticos de vida corta y la evaluación de la Política Nacional de Cambio Climático, entre otros. El documento está disponible *online* en <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/117>

2.2 Contexto institucional

2.2.1 Instrumentos legales

El instrumento más alto en la jerarquía institucional de México es la *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM)*, y en su artículo cuarto establece que: “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley...” (DOF, 2017). Además de este derecho, el artículo cuarto constitucional identifica otros derechos referidos a la conservación de la biodiversidad y los servicios que provee para su cumplimiento, como es el derecho a la salud, agua y saneamiento, así como el derecho a la alimentación, entre otros.

El artículo 27 constitucional establece el régimen de propiedad de los recursos naturales y es el fundamento de todas las leyes que regulan el uso del territorio y sus recursos. Este menciona que: “La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada...”. En este artículo se establecen todas las disposiciones vinculadas a la tierra, los bosques, el agua, los mares y el territorio nacional.

El siguiente nivel de análisis es el de las leyes federales y generales. Se revisaron las definiciones y los instrumentos de política relacionados de manera directa con la información proveniente de las cuentas de extensión, condición y valoración de los servicios ecosistémicos. El cuadro 2-1 muestra estos resultados.

Cuadro 2-1. Definiciones de servicios ambientales contenidas en las leyes federales y generales

Continúa

Ley y año de publicación en el <i>Diario Oficial de la Federación (DOF)</i>	Definición de servicios ambientales
<i>Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)</i> , 1998	Servicios ambientales: “Los beneficios tangibles e intangibles, generados por los ecosistemas , necesarios para la supervivencia del sistema natural y biológico en su conjunto, y para que proporcionen beneficios al ser humano”.

Cuadro 2-1. Definiciones de servicios ambientales contenidas en las leyes federales y generales

Conluye

Ley y año de publicación en el Diario Oficial de la Federación (DOF)	Definición de servicios ambientales
Ley de Aguas Nacionales (LAN), 1992	Servicios ambientales: “Los beneficios de interés social que se generan o se derivan de las cuencas hidrológicas y sus componentes, tales como regulación climática, conservación de los ciclos hidrológicos, control de la erosión, control de inundaciones, recarga de acuíferos, mantenimiento de escurrimientos en calidad y cantidad, formación de suelo, captura de carbono, purificación de cuerpos de agua, así como conservación y protección de la biodiversidad; para la aplicación de este concepto en esta Ley se consideran primordialmente los recursos hídricos y su vínculo con los forestales”.
Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS), 2018	Servicios ambientales: “Beneficios que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio del manejo forestal sustentable, que pueden ser servicios de provisión, de regulación, de soporte o culturales, y que son necesarios para la supervivencia del sistema natural y biológico en su conjunto, y que proporcionan beneficios al ser humano”.
Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS), 2001	Servicios ambientales (sinónimo: beneficios ambientales): “Los beneficios que obtiene la sociedad de los recursos naturales , tales como la provisión y calidad del agua, la captura de contaminantes, la mitigación del efecto de los fenómenos naturales adversos, el paisaje y la recreación, entre otros”.
Ley General de Vida Silvestre (LGVS), 2000	Servicios ambientales: “Los beneficios de interés social que se derivan de la vida silvestre y su hábitat , tales como la regulación climática, la conservación de los ciclos hidrológicos, la fijación de nitrógeno, la formación de suelo, la captura de carbono, el control de la erosión, la polinización de plantas, el control biológico de plagas o la degradación de desechos orgánicos”.
Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA), 2013	Servicios ambientales: “Las funciones que desempeña un elemento o recurso natural en beneficio de otro elemento o recurso natural , el hábitat, ecosistema o sociedad”.

Fuente: elaboración propia con base en el DOF, 1988, 1992, 2000, 2001, 2012, 2013 y 2018.

Hay que destacar la vinculación con las cuentas ambientales, ya que en el artículo 15, fracción XIX, de la LGEEPA se establece como uno de los principios de política ambiental que: “A través de la cuantificación del costo de la contaminación del ambiente y del agotamiento de los recursos naturales provocados por las actividades económicas en un año determinado, se calculará el Producto Interno Neto Ecológico. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática integrará el Producto Interno Neto Ecológico al Sistema de Cuentas Nacionales...” (DOF, 1988).

2.2.2 Compromisos internacionales

Además de generar datos que apoyen en la planeación del desarrollo nacional, los resultados del proyecto NCAVES aportan elementos para el cumplimiento de acuerdos internacionales, como las tres convenciones derivadas de la Cumbre de Medio Ambiente y Desarrollo de 1992, ratificadas en el Senado de la República y, posteriormente, publicadas en el *Diario Oficial de la Federación*, así como la Agenda 2030 del Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de Escazú, los cuales se detallan a continuación:

- a) El Convenio de Diversidad Biológica (CDB). En 2010, las Partes del CDB adoptaron el Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020, el cual constituyó por 10 años el marco de acción para que todos los países e interesados salvaguarden la diversidad biológica y los beneficios que proporciona a las personas. Actualmente, se está desarrollando el Marco Global de Biodiversidad Post-2020 que sustituirá al CDB, donde el Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico, Técnico y Tecnológico (SBSTTA, por sus siglas en inglés) ha elaborado recomendaciones para que este cuente con un conjunto de indicadores que puedan medir el progreso de las metas. Derivado del artículo sexto del CDB, México publicó en 2016 la *Estrategia Nacional Sobre Biodiversidad de México (ENBioMex)* y *Plan de Acción*.³ Este instrumento se elaboró en el marco de un amplio proceso de participación. El resultado es un documento que incluye seis ejes, 24 líneas de acción y 160 acciones. Teniendo como base el eje de conocimiento, a lo largo de sus objetivos y acciones se visibiliza la importancia de la valoración de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos como un elemento clave en la toma de decisiones.
- b) La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Entre los compromisos a los cuales México les da seguimiento en el marco de este convenio, algunos de los más importantes son la elaboración de las *Comunicaciones Nacionales* y los *Informes Bienales de Actualización*, así como las *Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional* (NDC, por sus siglas en inglés), las cuales fueron actualizadas en diciembre de 2020 (Gobierno de México, 2020). En la actualización de la NDC se visibiliza la relevancia de los servicios ecosistémicos en los compromisos de adaptación y se identifica la información relevante para “... facilitar la claridad, transparencia y comprensión de la actualización de la NDC para el periodo 2020 conforme a las reglas de Katowice...” (Gobierno de México, 2020).
- c) La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD). La CONAFOR es punto focal de esta convención. La *Ley de Desarrollo Rural Sustentable* establece, en el marco de Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Rural Sustentable, la conformación de un “... Sistema Nacional para el Combate de Lucha contra la Desertificación y Sequía [SINADES]...”, así como la existencia de comités estatales (SEDES).

3 <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/12890.pdf>

- d) La Agenda 2030 del Desarrollo Sostenible. Destaca que la implementación y el seguimiento de ocho de sus 17 objetivos se verían beneficiados por la información que se genere en el marco del proyecto NCAVES. Los objetivos 2, 3, 6 y 8 están relacionados de manera directa con el artículo cuarto constitucional y, como se dijo antes, la preservación de la biodiversidad y los servicios que provee es fundamental para su cumplimiento en el largo plazo. Los objetivos 11, 13, 14 y 15 son fundamentales no solo para garantizar el derecho al medio ambiente, sino para que los ecosistemas tengan las condiciones y la integridad para garantizar la provisión de los servicios ecosistémicos.
- e) El Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe (Acuerdo de Escazú, DOF, 2021). Su objetivo es garantizar la implementación plena y efectiva de los derechos a la información ambiental en América Latina y el Caribe; de manera específica, el artículo 5 trata sobre el acceso a la información ambiental, mientras que el 6 habla sobre la generación y divulgación de esta.

2.2.3 Instrumentos de política de la Administración Pública Federal

A continuación, se describen los instrumentos de la política pública para los cuales se considera que los resultados del proyecto NCAVES aportan elementos que mejoran su diseño, ejecución y evaluación.

De acuerdo con la *Ley de Planeación*, el *Plan Nacional de Desarrollo (PND)* es el documento que establece los objetivos nacionales, las estrategias y las prioridades del Gobierno Federal en la administración vigente. El PND 2019-2024 reconoce que: “El gobierno de México está comprometido a impulsar el desarrollo sostenible, que en la época presente se ha evidenciado como un factor indispensable del bienestar...” y define al desarrollo sostenible como “... la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades...” (DOF, 2019).

Derivados del PND están los programas sectoriales. El Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (PROMARNAT) 2020-2024, a cargo de la SEMARNAT, es uno de los instrumentos más importantes para el anclaje institucional de este proyecto en la administración actual desde dos perspectivas: sus objetivos estratégicos (ver recuadro 1), así como el reconocimiento de la importancia de la medición del progreso del Programa, el cual está contenido en el apartado denominado *Metas para el bienestar y parámetros*.

Recuadro 1. Objetivos prioritarios del PROMARNAT (DOF, 2020d)

1. Promover la conservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y su biodiversidad con enfoque territorial y de derechos humanos, considerando las regiones bioculturales, a fin de mantener ecosistemas funcionales que son la base del bienestar de la población.
2. Fortalecer la acción climática a fin de transitar hacia una economía baja en carbono y una población, ecosistemas, sistemas productivos e infraestructura estratégica resilientes, con el apoyo de los conocimientos científicos, tradicionales y tecnológicos disponibles.
3. Promover al agua como pilar de bienestar, manejada por instituciones transparentes, confiables, eficientes y eficaces que velen por un medio ambiente sano y donde una sociedad participativa se involucre en su gestión.
4. Promover un entorno libre de contaminación del agua, el aire y el suelo que contribuya al ejercicio pleno del derecho a un medio ambiente sano.
5. Fortalecer la gobernanza ambiental a través de la participación ciudadana libre, efectiva, significativa y corresponsable en las decisiones de política pública, asegurando el acceso a la justicia ambiental con enfoque territorial y de derechos humanos y promoviendo la educación y cultura ambiental.

Para el proyecto, son importantes también el Programa Nacional Forestal (PRONAFOR) de la Comisión Nacional Forestal 2020-2024 (DOF, 2020c) y el Programa Nacional Hídrico 2020-2024 a cargo de la Comisión Nacional del Agua. Ambos son especialmente relevantes para el anclaje institucional de este proyecto por el reconocimiento de la importancia de los servicios ecosistémicos, porque enmarca acciones concretas para la conservación de estos y contienen criterios para su medición y evaluación. En el caso del PRONAFOR se establece como una estrategia prioritaria “Impulsar la implementación de la Estrategia Nacional para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (ENAREDD+) para transitar a una tasa cero de deforestación neta y promueva la capacidad de adaptación a los efectos del cambio climático...” (DOF, 2020e). Además de los instrumentos de planeación, es necesario señalar las políticas que se instrumentan desde el sector ambiental y que han sido centrales para contener los factores de presión sobre la biodiversidad desde hace décadas. Estos instrumentos están anclados en las distintas legislaciones, principalmente la LGEEPA, la LGVS y la LGDFS (cuadro 2-1).

Las áreas naturales protegidas (ANP) son uno de los principales instrumentos de conservación del capital natural en México. La primera ANP del país se decretó en 1917, y hasta 2018 había decretadas 182 áreas de competencia federal (SEMARNAT, 2019). Los resultados del proyecto NCAVES proveerán información para este esquema de protección. Otros instrumentos relevantes para la conservación de los servicios ecosistémicos son los humedales de importancia internacional derivados de la Convención Ramsar (hay 142 sitios Ramsar en México) y el Programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA), el cual se instrumenta desde 2003 por la Comisión Nacional Forestal. Hasta 2017, la superficie beneficiada por el PSA en sus diferentes modalidades fue de 2.68 millones de hectáreas (SEMARNAT, 2019). Actualmente, este programa está incorporado dentro del programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable de la CONAFOR.

La información derivada del proyecto NCAVES, además de coadyuvar al seguimiento del *Plan Nacional de Desarrollo* en materia ambiental, y del programa sectorial respectivo (PROMARNAT), puede resultar útil para el desarrollo de instrumentos y acciones que fortalezcan y regulen el desempeño ambiental del país, como:

1. El ordenamiento ecológico del territorio, el cual tiene como objetivo “... regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente; la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales...” (DOF 1988).
2. La evaluación del impacto ambiental, que es “... un instrumento de la política ambiental dirigido al análisis detallado de diversos proyectos de desarrollo y del sitio donde se pretenden realizar. El propósito de este análisis es identificar y cuantificar los impactos que la ejecución de un proyecto determinado puede ocasionar al ambiente...” (SEMARNAT, 2019).
3. Destaca también el concepto de compensación como una de las posibles resoluciones para las autorizaciones en materia de impacto ambiental (LGEEPA), así como la referida en la *Ley Federal de Responsabilidad Ambiental* y la *Ley de Desarrollo Forestal Sustentable*.
4. Otro instrumento relevante que tanto la LGEEPA como la LGCC contemplan con respecto al carbono es el establecimiento de impuestos. Actualmente, existe en la *Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios (LIEPS)*, que a partir de 2013 establece lo que se conoce como el *impuesto al carbono*, definido como el impuesto aplicado a los combustibles fósiles por tonelada de carbono.

Otros sectores

Con respecto al sector productivo, el instrumento de planeación más relevante es el Programa Sectorial de Agricultura y Desarrollo Rural 2020-2024, el cual está a cargo de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y tiene entre sus objetivos y estrategias las acciones que

se benefician de las cuentas de valoración de carbono (suelos), agua y servicios en la agricultura. La SADER y la SEMARNAT publicaron en 2021 la *Estrategia Nacional para la Conservación y Uso Sustentable de los Polinizadores (ENCUSP)*, cuyo objetivo es orientar las políticas y el trabajo de los sectores productivo y ambiental en lo relativo a la conservación de los servicios ecosistémicos que brindan los polinizadores con el fin de contribuir al desarrollo sustentable y a la seguridad alimentaria del país.

Finalmente, el programa Sembrando Vida se conduce en 20 entidades del país. Este contiene especificaciones en sus reglas de operación para ingresar al programa, en las cuales se pretende que las áreas elegibles sean de uso predominantemente agropecuario evitando áreas forestales, ANP, UMAS o áreas afectadas por incendios forestales naturales o inducidos para ingresar al programa (DOF, 2020c). En este contexto, se puede considerar que el uso de la información que se genere en el marco del proyecto NCAVES (principalmente las cuentas de extensión y de condición) aportan información sustantiva para la ejecución de este instrumento de política.

2.2.4 Sistemas de información y actores clave en el marco del proyecto NCAVES

El INEGI es el organismo responsable de normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG). De acuerdo con la *Ley del SNIEG* (DOF, 2008), este tiene como propósito producir Información de calidad, pertinente, veraz y oportuna a efecto de coadyuvar al desarrollo nacional. Sus principios rectores son: accesibilidad, transparencia, objetividad e independencia.

Los objetivos del SNIEG son producir información, difundirla oportunamente a través de mecanismos que faciliten su consulta, promover el conocimiento y uso de la información y conservarla (recuadro 2).

Recuadro 2. Información de interés nacional de acuerdo con la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (DOF, 2008)

La *Ley del SNIEG* también establece lo que solo podrá considerarse información de interés nacional para efectos de esta ley, la que satisfaga los cuatro criterios siguientes:

- I. Se trate de los siguientes temas, grupos de datos o indicadores: población y dinámica demográfica; salud; educación; empleo; distribución de ingreso y pobreza; de gobierno, seguridad pública e impartición de justicia; vivienda; sistema de cuentas nacionales; información financiera; precios; trabajo; ciencia y tecnología; telecomunicaciones y radiodifusión; atmósfera; biodiversidad; agua; suelo; flora; fauna; residuos peligrosos y residuos sólidos; marco de referencia geodésico; límites costeros, internacionales, estatales y municipales; datos de relieve continental, insular y submarino; datos catastrales, topográficos, de recursos naturales y clima, y nombres geográficos, o bien se trate de temas que sean aprobados por unanimidad por el Consejo Consultivo Nacional, incluyendo aquéllos que deban conocer los Subsistemas a que se refiere el último párrafo del artículo 17 de este ordenamiento;
- II. Resulte necesaria para sustentar el diseño y la evaluación de las políticas públicas de alcance nacional;
- III. Sea generada en forma regular y periódica, y
- IV. Se elabore con base en una metodología científicamente sustentada.

Además, “Sin perjuicio de lo anterior, también podrá ser considerada como información de interés nacional la que resulte necesaria para prevenir y, en su caso, atender emergencias o catástrofes originadas por desastres naturales, y aquélla que se deba generar en virtud de un compromiso establecido en algún tratado internacional...” (DOF, 2008).

Además del SNIEG, se han identificado otros sistemas de información relevantes en el marco del proyecto; entre estos están los siguientes:

- El Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN), que está a cargo de la SEMARNAT y tiene su fundamento en la LGEEPA. Sus objetivos son “Registrar, organizar, actualizar y difundir la información ambiental nacional, que estará disponible para su consulta y que se coordinará y complementará con el Sistema de Cuentas Nacionales a cargo del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática...” (DOF, 1988).
- El Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNIGF), que está a cargo de la CONAFOR y se fundamenta en la LGDFS. Este integra otros instrumentos de política, como: el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFYS), el Sistema Nacional de Monitoreo Forestal, la Zonificación Forestal Nacional y el Registro Forestal Nacional.
- El Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) de México, el cual está a cargo de la CONABIO y tiene su fundamento en la LGEEPA. Sus objetivos son compilar, organizar y distribuir información sobre la biodiversidad de México (CONABIO 2021).

Con base en el análisis de leyes e instrumentos de política, así como de la información que generan diferentes instituciones de la Administración Pública Federal, en el cuadro 2-2 se presenta una síntesis de los principales proveedores de información y usuarios de este proyecto.

Cuadro 2-2. Organismos del gobierno federal proveedores y usuarios de información del proyecto NCAVES

Continúa

	Institución	Objetivos de la institución vinculados a los servicios ecosistémicos	Proveedor	Usuario
Organismos del sector ambiental	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	Es la cabeza del sector ambiental, encargada del diseño, la implementación y la evaluación de políticas ambientales entre las que destacan el OET, el Impacto Ambiental y la política de vida silvestre, así como la de la Zona Federal Marítimo-Terrestre. Es la encargada del SNIARN.	X	X
	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP)	Tiene entre sus principales atribuciones las de fomentar y desarrollar actividades tendentes a la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad en las ANP y sus zonas de influencia, en las áreas de refugio para proteger especies acuáticas y otras especies que por sus características se determinen como prioritarias para la conservación. Es la encargada del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINAP).	X	X
	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)	Entre sus objetivos está el de coordinar y realizar estudios y proyectos de investigación científica o tecnológica con instituciones académicas, de investigación, públicas o privadas, nacionales o extranjeras en materia de cambio climático, protección al ambiente, preservación y restauración del equilibrio ecológico. Tiene a su cargo la evaluación de la política de cambio climático, la elaboración de las <i>Comunicaciones Nacionales</i> en materia de cambio climático, así como la elaboración y actualización del <i>Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático</i> (ANVCC).	X	X

Cuadro 2-2. Organismos del gobierno federal proveedores y usuarios de información del proyecto NCAVES

Continúa

	Institución	Objetivos de la institución vinculados a los servicios ecosistémicos	Provee- dor	Usua- rio
	Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)	Su objetivo es desarrollar, favorecer e impulsar las actividades productivas, de conservación y de restauración en materia forestal, así como participar en la formulación de los planes y programas y en la aplicación de la política de desarrollo forestal. Desde 2003 instrumenta los programas de pago por servicios ambientales y Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSA y PSAH) desde el gobierno federal. Tiene a su cargo el SNIGF.	X	X
	Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)	Organismo desconcentrado cuya misión es administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes inherentes para lograr su uso sustentable con la corresponsabilidad de los tres órdenes de gobierno y la sociedad en general. Tiene atribuciones sobre los cuerpos de agua continentales. Tiene a su cargo el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), el Sistema de Información Geográfica del Agua (SIGA) y el Sistema de Información Hidrológica (SIH).	X	X
	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA)	Es un organismo desconcentrado que se encarga de, entre otros aspectos, vigilar y evaluar el cumplimiento de las disposiciones jurídicas aplicables en lo relativo a la biodiversidad.	X	
Organismos de otros sectores	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER)	Tiene a su cargo todas las atribuciones en materia de producción agropecuaria, pesquera y acuícola, así como el fomento al desarrollo rural. Sus acciones impactan de manera directa en la biodiversidad tanto en los ecosistemas como en las especies y en la diversidad genética.	X	X
	Secretaría de Bienestar	Entre sus atribuciones está participar en la coordinación e instrumentación de las políticas de desarrollo rural para elevar el nivel de bienestar de las familias, comunidades y ejidos, así como coadyuvar en el diseño e implementación de políticas públicas orientadas a fomentar la agroforestería, la productividad, la economía social y el empleo en el ámbito rural y a evitar la migración de las áreas rurales.		X
	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU)	Le corresponde elaborar y conducir las políticas de vivienda, ordenamiento territorial, desarrollo agrario y urbano en coordinación con las entidades federativas, municipios y, en su caso, las alcaldías de la Ciudad de México.		X
	Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)	Apoyar al Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) en los requerimientos técnicos que su operación demanda. Realiza actividades de investigación, capacitación, instrumentación y difusión acerca de fenómenos naturales y antropogénicos que pueden originar situaciones de desastre, así como acciones para reducir y mitigar los efectos negativos de tales fenómenos, para coadyuvar a una mejor preparación de la población para enfrentarlos.		X
	Secretaría de Marina (SEMAR)	Cumple diversas funciones estratégicas para la seguridad nacional, incluyendo la Armada de México; en materia de biodiversidad destacan entre sus atribuciones las de proteger los recursos marítimos, fluviales y lacustres nacionales, actuar e intervenir en la prevención y control de la contaminación marítima, así como vigilar y proteger el medio marino dentro del área de su responsabilidad.	X	X

Cuadro 2-2. Organismos del gobierno federal proveedores y usuarios de información del proyecto NCAVES

				Concluye	
	Institución	Objetivos de la institución vinculados a los servicios ecosistémicos	Provee-	Usua-	
Comisiones intersecretariales	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)	Su misión es coordinar las acciones y los estudios relacionados con el conocimiento y la preservación de especies biológicas, así como promover y fomentar actividades de investigación científica para la exploración, estudio, protección y utilización de los recursos biológicos tendientes a conservar los ecosistemas del país y generar criterios para su manejo sustentable. Tiene a su cargo el SNIB.	X	X	
	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC)	Es la encargada de promover la coordinación de acciones de las dependencias y entidades de la APF en materia de cambio climático, así como formular e instrumentar políticas nacionales para la mitigación y adaptación al cambio climático, además de su incorporación en los programas y acciones sectoriales correspondientes.		X	
	Comisión Intersecretarial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas (CIMARES)	Su objetivo es coordinar, en el ámbito de sus respectivas competencias, las acciones de las dependencias y entidades de la APF relativas a la formulación e instrumentación de las políticas nacionales para la planeación, ordenación y desarrollo sustentable de los mares y las costas del territorio nacional. Su cabeza de sector es la SEMAR y coordina la <i>Política Nacional de Mares y Costas</i> .		X	
	Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Rural Sustentable (CIDRS)	Tiene a su cargo integrar la <i>Política Nacional de Investigación para el Desarrollo Rural Sustentable</i> , la cual será de carácter multidisciplinario e interinstitucional considerando las prioridades nacionales, estatales y regionales; asimismo, llevará a cabo la programación y coordinación nacional en esta materia.		X	

Fuente: elaboración propia.

Con respecto al papel que juegan distintos actores en el marco del proyecto, los usuarios y proveedores de la información forman un espectro amplio y diverso que incluye: a) actores de gobierno: secretarías y dependencias de la Administración Pública Federal, organismos autónomos, comisiones intersecretariales, gobiernos estatales y gobiernos municipales; y b) otros actores, como el H. Congreso de la Unión, universidades y centros de investigación, organismos de cooperación y organizaciones de la sociedad civil, además de las personas, comunidades y sociedad en general, entre otros.

Para concluir este apartado, se debe señalar que tanto en el marco legal como en los instrumentos de política existen elementos que aportan hacia un cambio positivo en la conservación y el uso sustentable de los ecosistemas, el ordenamiento ecológico del territorio, las áreas naturales protegidas y la evaluación del impacto ambiental.

3 El Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SEEA)

El SEEA (por sus siglas en inglés) es un estándar estadístico internacionalmente aceptado (UN, 2021) que ofrece un marco de contabilidad confiable, el cual permite una comprensión profunda de las conexiones entre las actividades económicas y el medio ambiente. El SEEA integra información económica y ambiental, en términos físicos y monetarios, en un marco común que mide las contribuciones del medio ambiente en la economía y el impacto de la economía en este utilizando principios contables que permiten la comparabilidad e integración con el Sistema de Cuentas Nacionales (SCN).

Debido a su enfoque integral, el SEEA está bien posicionado para sustentar la toma de decisiones, la formulación y revisión de políticas, el análisis y la investigación, así como para respaldar el progreso en la medición de una serie de iniciativas globales, en particular la Agenda 2030, el Marco Global de Biodiversidad Post-2020 y la política de cambio climático.

El SEEA está compuesto por:

- i. Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica 2012–Marco Central (SEEA CF, por sus siglas en inglés). Analiza los activos ambientales, como: recursos hídricos, energéticos, forestales, pesqueros, entre otros; los cambios en los *stocks* debido a la extracción y otras causas; sus usos en la economía y retornos al medio ambiente en la forma de emisiones y descargas. El SEEA CF fue adoptado por la Comisión de Estadística de las Naciones Unidas en 2012 como el primer estándar internacional para contabilidad ambiental y económica.
- ii. Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica-Contabilidad de los Ecosistemas (SEEA EA, por sus siglas en inglés). Constituye un marco coherente para integrar la medición de los ecosistemas y los flujos de los servicios ecosistémicos con otras mediciones de las actividades económicas y humanas. El SEEA EA complementa la contabilidad de activos ambientales que se describen en el SEEA CF (recursos hídricos, suelo, etcétera) y considera a estos como activos ecosistémicos que funcionan como parte de los procesos naturales dentro de un área espacial determinada (figura 3-2).

El SEEA EA ha sido actualizado a través de un largo proceso de revisión que incluyó las aportaciones de los países piloto del proyecto NCAVES, así como el trabajo de más de 600 expertos interdisciplinarios e interinstitucionales de varias naciones y que culminó en marzo de 2021

Figura 3-1. El enfoque del SEEA: SEEA CF y SEEA EA

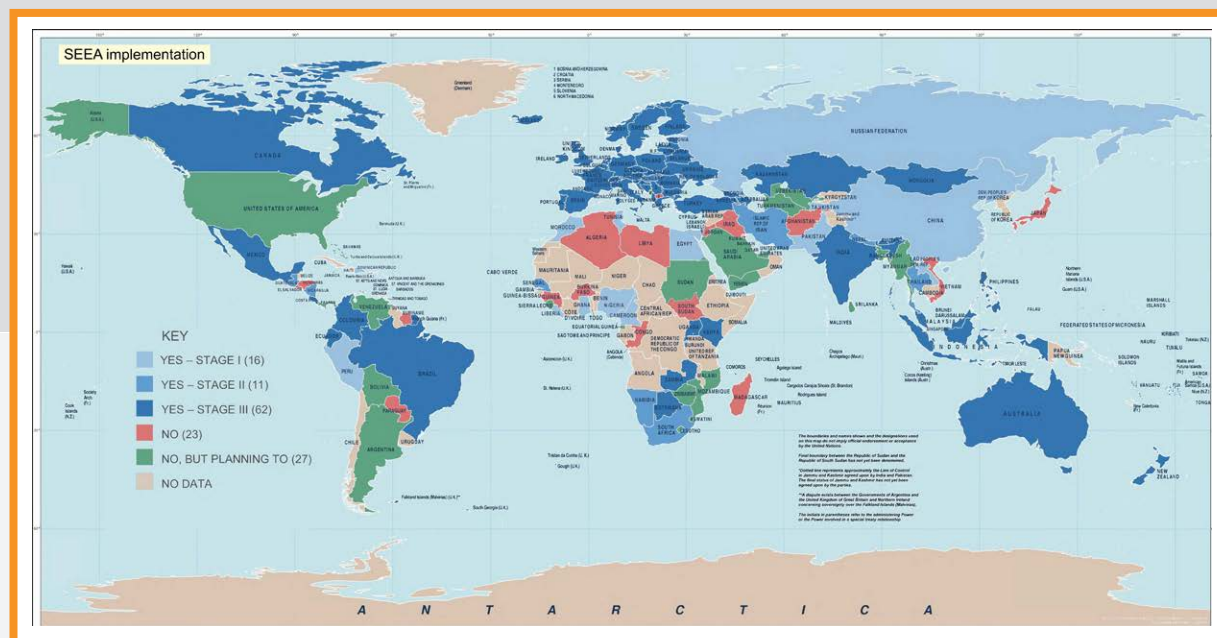


con la adopción, durante la 52.^a Comisión de Estadística de las Naciones Unidas del SEEA EA, como un estándar internacional en sus capítulos referidos al componente físico (capítulos 1-7), y con recomendaciones internacionales para el componente económico (capítulos 8-11), reconociendo la importancia de la valoración de los servicios ecosistémicos, que se continuará avanzando en su investigación.

3.1 El SEEA en el mundo

Los resultados publicados en el informe *2020 Global Assessment of Environmental-Economic Accounting*, llevado a cabo por la UNSD bajo los auspicios del Comité de Expertos en Contabilidad Económica Ambiental de las Naciones Unidas (UNCEEAA, por sus siglas en inglés), indican que en 2020 había 89 países implementando el SEEA CF y 34, el SEEA EA (figura 3-2). Adicionalmente, 25 naciones tenían planeado implementar el SEEA CF y 13, el SEEA EA.

Figura 3-2. Situación de la implementación global del SEEA 2020



Nota: los países coloreados en azul son los que están en alguna etapa de implementación del SEEA.

Fuente: UNSD (2020).

Desde la última evaluación global se ha presentado un aumento significativo en el número de países que implementan el SEEA; en 2020, el incremento fue de 29 % en comparación con 2017. En las naciones en desarrollo se observó un incremento de 47 %, mientras que en las desarrolladas el aumento fue de 14 % entre las evaluaciones de 2017 y 2020.

Respecto a las cuentas del SEEA EA que están siendo compiladas con mayor frecuencia por los países, tanto en desarrollo como desarrollados, son las de extensión, condición y de servicios de los ecosistemas. En cuanto a los planes para la compilación de otras cuentas, todas las naciones expresaron que su prioridad son las cuentas de extensión, condición y monetarias de activos de los ecosistemas. Cabe mencionar que los países desarrollados priorizaron las cuentas de tierra, agua y ciudades, mientras que los países en desarrollo consideran prioritarias las de servicios ecosistémicos, así como las de *stock* y flujos de carbono.

3.2 Situación de la contabilidad ambiental y económica en México

La contabilidad de capital natural y la valoración económico-ambiental en México ha seguido de cerca los desarrollos que tienen lugar en el ámbito internacional. Desde principios de la década de los 90, el gobierno de México, en particular a través del INEGI y la entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), posteriormente transformada en la SEMARNAT, junto con el sector académico del país y organizaciones no gubernamentales (ONG) ambientales internacionales y locales, se han comprometido a compilar y difundir cuentas ambientales y económicas integradas, así como a realizar investigaciones y propuestas metodológicas sobre la valoración económico-ambiental.

El desarrollo del esquema de contabilidad económica y ambiental en México ha implicado realizar extensiones del esquema tradicional de la contabilidad nacional destacando la expansión de la frontera de los activos para dar cabida a los activos no producidos, es decir, a los recursos naturales y al medio ambiente. Los resultados se presentan en las de Cuentas Económicas y Ecológicas de México (CEEM), las cuales han sido desarrolladas por el INEGI como una de las Cuentas Satélite del Sistema de Cuentas Nacionales de México.

3.3 La contabilidad de los ecosistemas del SEEA

El marco del SEEA EA⁴ (UN, 2021) ofrece un sistema de información integrado para contabilizar: a) los activos de los ecosistemas, incluyendo su extensión, condición, capacidad, los servicios de los ecosistemas, así como los valores monetarios correspondientes; y b) las actividades económicas y humanas, además de sus beneficiarios asociados (gobiernos, em-

4 *System of Environmental-Economic Accounting-Ecosystem Accounting: Final Draft*, documento preparado por el Comité de Expertos sobre Contabilidad Ambiental y Económica y presentado ante la 52.^a Comisión Estadística de las Naciones Unidas, División de Estadística del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. Marzo de 2021. Documento disponible en https://unstats.un.org/unsd/statcom/52nd-session/documents/BG-3f-SEEA-EA_Final_draft-E.pdf

presas y hogares). La integración de la información económica y de los ecosistemas pretende incorporar su uso para sustentar la toma de decisiones.

La aplicación del SEEA EA a nivel nacional tiene el propósito de lograr la integración de la información de los múltiples tipos de ecosistemas y sus servicios con información macroeconómica.

Tomando en cuenta la escala de análisis, los datos disponibles y las necesidades de información y de política pública, el marco del SEEA EA también puede ser utilizado a nivel subnacional, por ejemplo, para la delimitación de áreas geopolíticas o administrativas (regiones, estados, municipios o ciudades), así como otros tipos de áreas de carácter ambiental (cuencas hidrográficas o áreas naturales protegidas).

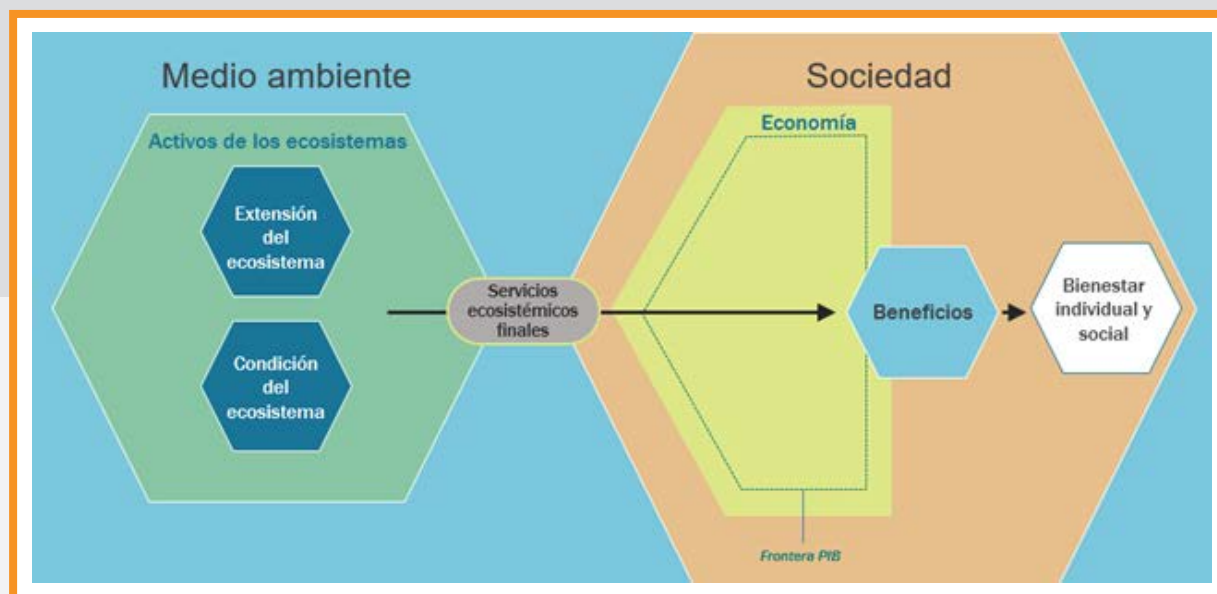
3.3.1 Enfoque conceptual de la contabilidad de ecosistemas del SEEA

La contabilidad de ecosistemas tiene el potencial para representar de manera espacialmente explícita el medio ambiente biofísico, definiendo así áreas espaciales diferenciadas donde cada una integra los activos de los ecosistemas, como: bosques, humedales, áreas agrícolas, etcétera.

Según la lógica de este tipo de contabilidad, cada uno de los activos de los ecosistemas produce una canasta de servicios ecosistémicos asociados. Los flujos de los servicios, dentro de un periodo definido, dependerán de la extensión y de la condición del activo del ecosistema (figura 3-3). De esta manera, la contabilidad de los ecosistemas registra, para un periodo de estudio: i) los activos de apertura y cierre de los ecosistemas, incluidos sus cambios; ii) la oferta de los servicios de los ecosistemas, por tipo de activo; y iii) los usuarios de los servicios de los ecosistemas.

Los flujos de los servicios de los ecosistemas se diferencian de los flujos de sus beneficios. El término *beneficios*, tal como se utiliza en el SEEA EA, comprende: a) los beneficios del Sistema de Cuentas Nacionales (SCN), es decir, los productos (bienes y servicios) producidos por las unidades económicas registradas en las cuentas nacionales; y b) los beneficios fuera del SCN que son generados por los ecosistemas y consumidos directamente por los individuos y las sociedades. La medición del bienestar no es el objetivo de la contabilidad de los ecosistemas; sin embargo, los datos que se integran a través del marco de contabilidad de los ecosistemas pueden respaldar tal medición.

Figura 3-3. Marco general de la contabilidad de los ecosistemas



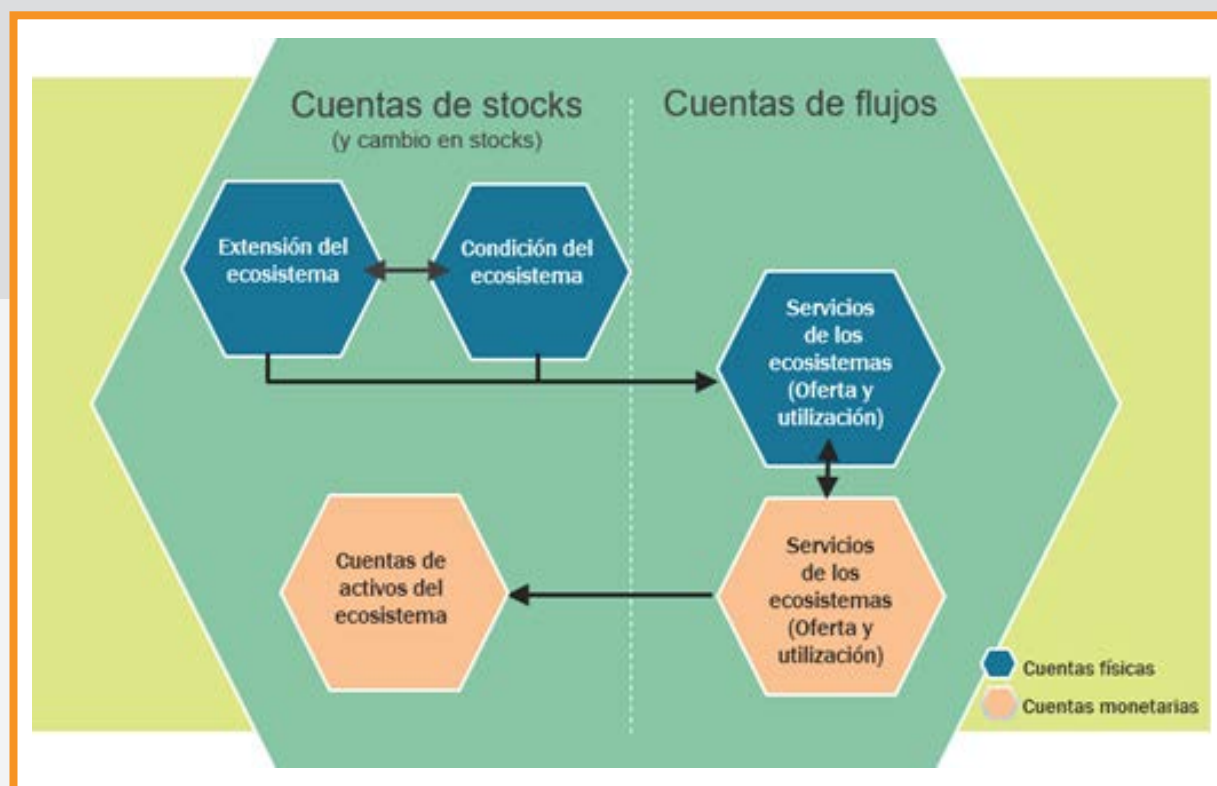
Fuente: UNSD (2021).

3.3.2 Las cuentas de los ecosistemas

El SEEA EA es un marco estadístico integrado para organizar datos biofísicos, medir los servicios de los ecosistemas, examinar los cambios en los activos de los ecosistemas y vincular esta información con la actividad económica y humana. Comprende un conjunto de cuentas que presentan colectivamente una visión coherente y completa de los ecosistemas (SEEA EA, 2020). Las cuentas que conforman el SEEA EA se ilustran en la figura 3-4 y se describen a continuación:

1. La **cuenta de extensión** del ecosistema, a partir de datos geospaciales, contabiliza el área de cada uno de los tipos de ecosistemas dentro de un país o una región. Esta cuenta es el punto de partida de la contabilidad de ecosistemas y la base para la construcción de la cuenta de condición y la cuantificación de los flujos de los servicios de los ecosistemas.

Figura 3-4. Las cuentas de los ecosistemas



Fuente: UNSD (2021).

2. La **cuenta de condición** de los ecosistemas mide la calidad de un ecosistema en relación con su integridad ecológica a lo largo del tiempo. Esta cuenta se organiza a partir de datos biofísicos que son estructurados conforme a las características abióticas y bióticas del ecosistema.
3. Las **cuentas de flujo de servicios de los ecosistemas** cuantifican los flujos de los servicios finales que proveen los ecosistemas y su aprovechamiento por parte de las unidades económicas (hogares, empresas y gobierno). Estos flujos se cuantifican en términos físicos y monetarios. Su valoración requiere del uso de conceptos de valoración alineados con el SCN.
4. La **cuenta monetaria de activos del ecosistema** contabiliza el valor monetario del *stock* de apertura y de cierre de todos los activos del ecosistema dentro del área contable, así como las adiciones y reducciones al *stock* durante el periodo contable.

El valor de los activos de los ecosistemas se puede calcular a partir de las estimaciones monetarias de los flujos de los servicios de los ecosistemas durante su vida útil. Este enfoque implica que el valor del activo del ecosistema está relacionado con su capacidad de suministrar servicios ecosistémicos y sus cambios a través del tiempo en función de la incidencia de disturbios.

En conjunto, estas cuentas permiten la medición de los ecosistemas y sus servicios, así como su integración con datos económicos como un primer paso para su incorporación al SCN. Gracias a la naturaleza espacial de la contabilidad de ecosistemas, la información se presenta en mapas. Los vínculos entre los ecosistemas y la economía se pueden presentar en términos físicos y monetarios. El SEEA EA ofrece un enfoque modular y flexible para la elaboración de las cuentas.

De modo complementario, el SEEA EA también incluye las llamadas cuentas temáticas, las cuales se obtienen combinando datos de las cuentas de ecosistemas con datos de otras cuentas del SEEA CF y del SCN, así como de otras fuentes. Estas cuentas son independientes y se compilan para apoyar el análisis y discusión en términos de política pública desde una perspectiva temática, por ejemplo, sobre carbono, cambio climático, biodiversidad, océanos, áreas urbanas, áreas protegidas, entre otros.

El proceso de elaboración de las cuentas requiere de la integración de una serie de fuentes de datos geoespaciales, biofísicos y económicos. Son necesarias múltiples iteraciones a lo largo del proceso contable para lograr presentar una visión coherente y consistente de los ecosistemas a través de las cinco cuentas que, en conjunto, constituyen el SEEA EA.

Las cuentas piloto de los ecosistemas terrestres que se elaboraron como parte de este proyecto son la cuenta de extensión, la de condición de los ecosistemas terrestres, las cuentas de flujos de servicios ecosistémicos (valoración): provisión de alimentos, provisión de agua superficial, captura y almacenamiento de carbono y servicios de polinización en la agricultura y los cuadros de oferta y utilización de los ecosistemas. Estas cuentas, cuya compilación se hizo a nivel nacional, proporcionan la estructura básica de este reporte.

4 Cuentas de extensión de los ecosistemas terrestres en México

Mensajes clave

La extensión de los diferentes ecosistemas presentes en el país, tanto naturales como de origen antrópico, no es uniforme.

En 2014, los ecosistemas naturales con mayor extensión son, en orden descendente, el matorral xerófilo no leñoso (19 %), pastizal (16 %), matorral xerófilo leñoso (10 %), selva caducifolia (9 %), bosque de coníferas (9 %), bosque de encino (8 %) y selva perennifolia (5 %). El ecosistema de origen antrópico con mayor extensión es la agricultura anual (16 %).

Casi todas las categorías de vegetación natural mostraron cambios netos y tasas de cambio negativos durante 2002-2014.

El cambio neto más negativo lo presentó la categoría de selva subcaducifolia (-7 744 km²) seguido por el pastizal (-7 038 km²) y matorral xerófilo leñoso (-5 811 km²). Otras categorías con regresiones importantes son la selva perennifolia (-5 786 km²) y el matorral xerófilo no leñoso (-3 719 km²). En los bosques se observó un alto dinamismo entre adiciones y reducciones que resulta en un balance cercano a cero, con excepción del bosque mesófilo de montaña, que mostró una mayor reducción proporcional a su extensión respecto a los otros ecosistemas boscosos.

Entre 2002 y 2014, la tasa de cambio más negativa se observó para la selva subcaducifolia seguido por la selva perennifolia, que se han reducido a una tasa de 1.47 y 0.47 % anual, respectivamente. Otras categorías con tasas de cambio negativas notables son especial otros tipos leñosos y el matorral xerófilo leñoso.

Las categorías de uso del suelo presentaron cambios netos y tasas de cambio positivos.

La agricultura anual es la categoría con más adiciones entre 2002-2014, seguida por los asentamientos humanos. Sin embargo, como se trata de categorías con una extensión grande, las tasas de cambio fueron relativamente bajas (< 1). La que tuvo la más alta en total es el bosque cultivado, a pesar de que las áreas absolutas son pequeñas. Otra con tasas de cambio altas es la acuícola.

Los ecosistemas que han perdido la mayor superficie de extensión histórica son la selva perennifolia y la selva caducifolia, conservando alrededor de 50 % de su extensión original.

Transiciones (cambios de una categoría en 2002 a otra en 2014) importantes

El proceso de cambio que afecta la mayor extensión es la transformación de ecosistemas naturales en áreas antrópicas, que abarca un poco más de 3 % de todo el territorio. El ecosistema más afectado es el pastizal, el cual fue transformado en agricultura anual. En términos absolutos, los ecosistemas naturales que más se convirtieron son las selvas, seguidas de los matorrales y bosques. Las selvas mayormente transformadas son la subcaducifolia, perennifolia y caducifolia, en ese orden. En términos proporcionales de su extensión, los bosques de coníferas, de encino y mesófilo muestran una superficie deforestada similar entre ellos. En cuanto a la vegetación hidrófila, se ha perdido dos veces más la correspondiente a la no leñosa que la leñosa.

La regeneración natural comprende la mitad de la extensión de conversión, indicando una pérdida importante de ecosistemas naturales, a pesar de existir también un intercambio constante entre áreas deforestadas y regeneradas.

Considerando los factores de presión directa inferidos por el análisis de cambios entre 2002 y 2014, el matorral xerófilo leñoso es el ecosistema que ha sido mayormente transformado en áreas urbanas; mientras que el no leñoso se ha convertido en mayor proporción en agricultura anual.

4.1 Introducción

El uso humano del suelo y sus efectos sobre los ecosistemas naturales y los servicios ecosistémicos ha sido reconocido como el factor más importante para explicar la alarmante pérdida de biodiversidad que está ocurriendo actualmente (Newbold *et al.*, 2016; IPBES, 2019).

En este contexto, el punto de partida común para la contabilidad de los ecosistemas consiste en la organización de la información espacial para medir la extensión y ubicación de los diferentes tipos de ecosistemas dentro de un país u otra área contable y registrar sus cambios a lo largo del tiempo. Esta información se muestra de manera espacialmente explícita y se registra en forma tabular mostrando la extensión de apertura y de cierre por cada tipo de ecosistema.

La cuenta de extensión proporciona la infraestructura subyacente para la medición de la condición del ecosistema, y para la medición y modelado de una gran variedad de servicios del

ecosistema, los cuales se valoran en términos físicos y monetarios para su posterior integración a las cuentas nacionales. También, forma parte de la base para generar indicadores de conversión, fragmentación, urbanización y otros procesos de cambio.

Antes de comenzar con la elaboración de las cuentas de los ecosistemas se requiere hacer una delimitación espacial de estos de acuerdo con una clasificación que sea apropiada para este objetivo.

4.2 Clasificación de los ecosistemas en México

El marco del SEEA EA considera que el área contable de los ecosistemas (ACE) puede ser un país, una región, un estado, una cuenca hidrográfica, etcétera. Por otra parte, identifica y caracteriza los activos ecosistémicos (AE), los cuales son las unidades espaciales que representan a los ecosistemas. De esta forma, los activos ecosistémicos forman parte de la totalidad del ACE y se agrupan por tipo de ecosistema conforme a una clasificación de ecosistemas basada en una perspectiva ecológica.

A nivel nacional, el ACE comprende todos los ecosistemas terrestres, acuáticos y marinos dentro de los límites fronterizos del país y su zona económica exclusiva. Para fines de este proyecto, el ACE comprende únicamente los ecosistemas terrestres a nivel nacional.

Los ecosistemas son áreas que forman un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y microorganismos y su medio no viviente, los cuales interactúan como una unidad funcional (CDB, 1992). Considerando esta definición, se estima que los datos de cobertura terrestre por sí mismos son insuficientes para delinear adecuadamente los activos de los ecosistemas. Por lo tanto, es necesario considerar para la delineación de estos una gama más amplia de atributos ecológicos (bióticos y abióticos) e incluso otras características, como: la estructura física y el tipo de vegetación, la composición de las especies, los procesos ecológicos, el clima, la hidrología, los tipos de suelo, entre otros.

Dada la gran diversidad biológica que hay en México, y a la dificultad que esto implica para poder identificar y caracterizar los ecosistemas dentro del territorio nacional, actualmente no existe un sistema de clasificación de ecosistemas a nivel nacional.

Un buen punto de partida para delinear y clasificar los ecosistemas terrestres suele ser la cobertura vegetal dominante. Una mejor aproximación se logra con un sistema de clasificación específico para cada país, en especial si ya hay un sistema de este tipo en operación. Un

sistema así seguramente reflejará las condiciones locales, aunque también se corre el riesgo de que sea muy específico y entonces dificulte comparar los resultados a nivel internacional.

4.2.1 Sistema de clasificación de la vegetación en México

En el país, a lo largo de varias décadas, se han formulado distintos sistemas de clasificación de la vegetación que representan un buen punto de inicio para reconocer la disposición de los valores ecosistémicos en el territorio nacional. Se ha evolucionado hasta constituir el Sistema de Clasificación de la Vegetación y Uso del Suelo desarrollado por el INEGI. Basado en los propuestos por Miranda y Hernández-X. (1963) y Rzedowsky (1978), el del INEGI constituye en la actualidad el sistema de vegetación natural e inducida y de los usos de suelo más completo y detallado de México, y se utiliza frecuentemente para describir el contexto ambiental y los ecosistemas terrestres mexicanos.

Dentro de este sistema, las clases están organizadas con base en las características de los diferentes tipos de vegetación, de tal forma que se definen en primer orden los grandes grupos que, a su vez, comprenden los tipos de vegetación con afinidad ecológica y fisonómica. En su versión más reciente, el sistema incluye 12 formaciones vegetales subdivididas en 58 tipos organizados en un sistema jerárquico. Esta clasificación distingue, además, por cada tipo de vegetación, diferentes estados de desarrollo de la vegetación: **primaria** (sin alteración) y **secundaria** (que surge después de una alteración, por causas naturales o antrópicas, y se encuentra en una fase de desarrollo: herbácea, arbustiva o arbórea). Se incluyen, también, los diferentes sistemas manejados por el hombre y que constituyen propiamente una cubierta de usos del suelo por actividad (agrícola, pecuaria, forestal y acuícola) y agrupadas por tipo de agroecosistema resultado de usos de suelo. El sistema también distingue las áreas desprovistas de vegetación, asentamientos humanos y cuerpos de agua (INEGI, 2017c). En conjunto, el Sistema de Clasificación de la Vegetación y Uso de Suelo de INEGI resulta en combinaciones de más de 200 clases de vegetación y 24 clases de uso de suelo. Este, representado cartográficamente a nivel nacional, es el punto de partida para lograr la representación de los tipos de ecosistemas terrestres para este proyecto.

Buscando utilizar una clasificación que agrupara los ecosistemas en un menor número de clases, se optó por utilizar una versión simplificada que fue desarrollada por la CONAFOR para reportar el Inventario Nacional de Emisiones conforme a los lineamientos del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2003). Esta clasificación, a la que nos referiremos de aquí en adelante como CONAFOR-IPCC-N3, incluye 14 tipos de vegetación (12 de los cuales están segregados en primaria y secundaria), cinco clases de uso de suelo y una

para cuerpos de agua. Los tipos de vegetación fueron segregados en subcategorías correspondientes a la dominancia de elementos leñosos (arbórea y arbustiva) y no leñosos (herbácea) en sus diferentes fases de desarrollo. De esta forma, la clasificación CONAFOR-IPCC-N3 resulta en 32 clases (véase *Anexo 9.1*).

4.2.2 Correspondencia entre sistemas de clasificación de los ecosistemas

En México se han generado múltiples representaciones cartográficas de unidades ambientales que, de diversas maneras, recogen aspectos ecosistémicos, cada uno según los variados intereses y concepciones de sus autores. Durante el proceso de análisis de las fuentes de datos se encontraron varias opciones potencialmente útiles para la identificación y caracterización de los ecosistemas, entre ellas la cobertura espacial de las zonas de vida de Holdridge que ha producido la CONABIO.

También, se encontró interés en la propuesta impulsada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) que busca integrar una tipología global de ecosistemas (IUCN GET, por sus siglas en inglés) que es considerada por el SEEA EA como el sistema de referencia para clasificar y mapear todos los ecosistemas de la Tierra, incluyendo los acuáticos y marinos, con base en sus funciones y composición. Debido a que el producto IUCN GET no se encuentra cartografiado para México, no fue posible hacer una correspondencia con la clasificación nacional. No obstante, se llevó a cabo una asociación conceptual entre las categorías de ecosistemas de IUCN GET y la clasificación utilizada para este proyecto piloto.

Una de las clasificaciones más utilizadas en México es la de las Regiones Ecológicas de América del Norte (también llamadas Ecorregiones de Norteamérica) elaborada por la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA) con el objetivo de tener una clasificación mapeada de las regiones ecológicas de México, Canadá y Estados Unidos de América (CCA, 1997). Estas regiones ecológicas representan cuatro niveles de ecorregiones dentro de un sistema jerárquico. El producto cartográfico de las *Ecorregiones para México*, desarrollado por el INEGI, la CONABIO e el INE, está representado a escala 1:1 000 000 con los cuatro niveles de regionalización propuestos por la CCA (INEGI-CONABIO-INE, 2008). Se estima que el nivel 2 de las ecorregiones podría aproximar los criterios de la IUCN GET.

4.2.2.1 Interoperabilidad entre distintos sistemas de clasificación

Considerando la creciente necesidad de los usuarios de tener diferentes representaciones de los ecosistemas dependiendo del propósito de análisis, y considerando los méritos relativos de cada producto, se concluyó que es importante generar medios para incorporar las diversas apreciaciones del despliegue espacial de los ecosistemas. Por lo anterior, se propuso el desarrollo de un dispositivo de cálculo para favorecer la interoperabilidad de la información ecológica disponible recurriendo a herramientas de inteligencia artificial (Véase Anexo 9.2).

4.3 Metodología

El procedimiento general para la elaboración de las cuentas de extensión consiste en tres pasos metodológicos: i) identificar los ecosistemas o *activos ecosistémicos* presentes en México (como se describe en la sección 4.2.1 anterior, se acordó utilizar para este piloto una representación abreviada de la vegetación denominada CONAFOR-IPCC N3); ii) compilar las cuentas de extensión de los diferentes ecosistemas en cada fecha a partir de esta segmentación del espacio geográfico nacional; y iii) desarrollar un análisis de cambios para poder obtener información detallada sobre aumentos y reducciones en la extensión de los ecosistemas mediante la comparación de mapas del país en momentos diferentes, siguiendo las mejores prácticas establecidas para el análisis de cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS) en México (Más *et al.*, 2004). Como control de calidad para el análisis de cambios, se revisó la correspondencia geométrica de las cartas.

4.3.1 Insumos cartográficos

En México, existen seis series cartográficas de uso del suelo y vegetación (CUSV) generadas por el INEGI a nivel nacional a una escala 1:250 000. Estas cartas "... representa(n) la localización y extensión de los diferentes tipos de vegetación y agricultura. Incluyen también símbolos que indican actividades de uso pecuario y forestal, y códigos de cultivos y diversas especies

vegetales. También involucran información de campo acerca de prácticas agrícolas y cultivos, así como estructura, composición, uso y dinámica de la vegetación...” (INEGI, 2007).

La versión digital consiste en el Modelo de Datos Vectoriales y “... un sistema de clasificación de los diferentes tipos de agricultura y de los tipos de vegetación de México...” (INEGI 2007). Debido a diferencias metodológicas entre las dos primeras versiones y las posteriores, se utilizaron los mapas de los años 2002 (Serie III, INEGI 2005), 2007 (Serie IV; INEGI, 2008), 2011 (Serie V; INEGI, 2013) y 2014 (Serie VI; INEGI 2016), conformando cuatro periodos de análisis (2002-2007, 2007-2011, 2011-2014 y 2002-2014).

4.3.1.1 Ajustes a los datos de insumo

Con el objetivo de contar con una extensión homogénea del territorio continental a través del tiempo, fue necesario hacer un ajuste geométrico de los polígonos para subsanar ligeras diferencias en la línea de costa y los cuerpos de agua costeros. La diferencia de área total entre los diferentes años en formato *raster* fue de 0.001 % (1 964 382.99 km²/1 964 353.74 km²), asegurando que las diferencias observadas sean debido a cambios en la extensión de los ecosistemas y no en artefactos cartográficos.

Un procedimiento adicional consistió en aplicar una máscara de agua a cada periodo de análisis para asegurar que los cambios en extensión no fueron influidos por la variabilidad inter-anual de los cuerpos de agua epicontinentales, lo cual es reconocido como un problema recurrente de exactitud de este tipo de objetos en interpretaciones de imágenes de satélite. El procedimiento consistió en generar un mapa de la extensión máxima de agua, considerando las cuatro fechas de los insumos, sumando los píxeles clasificados como agua en cada fecha. De esta manera, se aseguró que no hubiera cambios entre cuerpos de agua y las otras categorías (ver también cambios imposibles en el apartado 4.3.3).

4.3.1.2 Unidades espaciales básica y de área contable

Para contar con insumos espacialmente congruentes en el análisis de los cambios entre diferentes años, se utilizó una malla de píxeles que cubre toda el área de estudio y que es la base para cualquier operación espacial en el sistema de contabilidad, a la cual nos referiremos como

la malla primaria. Esta consiste en píxeles de 250 metros y un *extent* estándar, de acuerdo con la resolución espacial de la unidad básica espacial correspondiente a la escala original de los insumos (1:250 000). La proyección *Albers Equal-area* representa el territorio nacional en su totalidad sin deformaciones y permite calcular el área de manera confiable, por encima de otras, como: forma, distancia, etcétera.

4.3.2 Contabilidad de la extensión de ecosistemas y sus cambios

Con el marco espacial establecido y los insumos reclasificados, se generaron las cuentas de extensión para los tipos de vegetación, combinando en una sola las subcategorías primaria y secundaria de un mismo tipo de vegetación, esto para facilitar su análisis y evitar mezclar el estado de la vegetación con su extensión.

Con base en el sistema de clasificación adoptada para los análisis, se calcularon las extensiones de cada tipo de vegetación, para cada una de las fechas disponibles. A partir de estos datos, y con ayuda de las matrices de cambio, se elaboraron las cuentas de extensión de los ecosistemas para cada uno de los periodos contables, incluyendo las variables: extensión de apertura, los aumentos o las disminuciones y la extensión de cierre (cuadro 4-2).

Dependiendo de los factores que producen los cambios en extensión, tanto las adiciones como las reducciones en extensión, se contabilizan como **controladas** (antrópicas o causadas por la acción directa del hombre) o **naturales** (ocasionadas por procesos naturales o de manera indirecta por el hombre). Todas las adiciones o reducciones son consideradas conversiones del ecosistema, lo cual implica un cambio en el tipo de ecosistema.

Debido a la máscara de cuerpos de agua que se aplicó a los insumos, los cuerpos de agua no cambian en extensión dentro de los periodos de análisis.

Con el objetivo de simplificar el análisis de cambios, las clases de vegetación se redujeron de 32 a 20, considerando los estados sucesionales primario y secundario de todos los tipos de vegetación. De esta manera, se logró también una interpretación ecológica más clara de los resultados y sus cambios, en términos propiamente de la extensión. Conforme al SEEA EA, los cambios resultantes en condición no indican una conversión del ecosistema por lo que no deben considerarse como adiciones o reducciones.

Se reportan tres indicadores de extensión y sus cambios:

1. Extensión absoluta en kilómetros cuadrados.
2. Tasa de cambio anualizada (FAO, 1996).⁵
3. Proporción remanente respecto a la extensión potencial original (Rzedowski, 1990).

4.3.3 Matrices de cambio

El enfoque del SEEA EA busca establecer las bases para contar con series de tiempo que permitan apreciar las tendencias de cambio, además de proveer información más detallada sobre aumentos y reducciones en la extensión de los ecosistemas. Para hacer esto último, se utilizan *las matrices de cambio*,⁶ las cuales se obtienen al realizar la intersección de los mapas de dos periodos. Estas muestran las transiciones o cambios en los ecosistemas, es decir, de dónde provinieron los aumentos y el tipo de vegetación o uso del suelo en el que se transforman las disminuciones. Esto, además, permite tener algunos indicios sobre los conductores directos responsables de los cambios observados.

En la figura 4-1 se muestra la estructura de la matriz de cambio, donde se presentan los cambios o transiciones entre diferentes clases de ecosistemas en dos puntos del tiempo, las filas representan los datos del inicio del periodo y las columnas, los datos del final del periodo contable, de manera tal que cada celda contiene las unidades de superficie (km²) que pasaron de una categoría del tiempo inicial (fila) a otra en el final (columna). Las celdas blancas en diagonal representan las unidades de superficie (km²) de cada categoría que se mantuvieron sin cambios, mientras que los aumentos o reducciones se muestran en las otras celdas. El total de la extensión de apertura se registra en la última columna a la derecha y el total de la extensión de cierre, en la fila inferior.

Para el análisis de cambios, se definieron las siguientes categorías con el fin de describir las transiciones y las permanencias, las cuales se ilustran en la figura 4-1:

- 5 La tasa anual de cambio se calcula con la fórmula $r = ((s_2/s_1) (1/t)) \times 100 - 100$, donde r es la tasa, s_2 y s_1 son las superficies para los tiempos final e inicial, respectivamente, y t es el tiempo transcurrido entre fechas. Se aclara que los resultados obtenidos con la fórmula de la FAO (1996) fueron invertidos, ya que la fórmula original reporta conversión, así que una pérdida en extensión de un ecosistema se reporta como una cifra positiva (ocurrió tanta conversión). Sin embargo, como aquí el interés es conocer la tasa de cambio y no la tasa de conversión, la inversión del signo resulta de tal forma que la pérdida de extensión corresponde a una cifra negativa y el aumento en extensión, una cifra positiva.
- 6 También llamada matriz de transición.

- **Conversión** o pérdida de ecosistemas naturales (en color anaranjado): cualquier transformación de vegetación natural hacia alguna de las categorías de uso del suelo.
- **Urbanización** (en anaranjado fuerte): la transformación de uso del suelo agrícola en asentamientos humanos.
- **Regeneración natural** (en verde): cualquier transición de alguna variante de uso del suelo a vegetación natural, además de las permanencias, que son:
 - **De uso del suelo** (en color gris): se refiere a las transiciones entre categorías de usos de suelo (ecosistemas de origen antrópico).
 - **De vegetación natural** (en verde claro): se refiere a las transiciones entre categorías de ecosistemas naturales.
 - **De agua** (en color azul): incluye las transiciones entre cuerpos de agua; sin embargo, se utilizó una máscara de agua para mantener constantes los cuerpos de agua y así evitar este tipo de cambios.

Es importante señalar que una comparación de series cartográficas, como la que se hizo en este caso, está expuesta a detectar lo que se denominan cambios **imposibles**⁷ (por ejemplo,

⁷ Estos cambios también se conocen como cambios espurios o imposibles.

Figura 4-1. Ejemplo de una estructura de matriz de cambio

	Ecosistemas antrópicos (uso de suelo)					Ecosistemas naturales terrestres																
Categorías	Acuicola	Agrícola anual	Agrícola perenne	Asentamientos	Bosque cultivado	Bosque de coníferas	Bosque de encino	Bosque mesófilo de montaña	Especial otros tipos leñoso	Especial otros tipos no leñoso	Matorral xerófilo leñoso	Matorral xerófilo no leñoso	Otras tierras	Pastizal	Selva caducifolia	Selva perennifolia	Selva subcaducifolia	Vegetación hidrófila leñosa	Vegetación hidrófila no leñosa	Agua	Total	
Acuicola						Regeneración natural (cualquier transformación de uso del suelo a vegetación natural)																Stock de apertura
Agrícola anual	Permanencia uso de suelo			Urbanización																		
Agrícola perenne	NA	NA	NA		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Asentamientos																						
Bosque cultivado																						
Bosque de coníferas																					NA	
Bosque de encino																					NA	
Bosque mesófilo de montaña																					NA	
Especial otros tipos leñoso																					NA	
Especial otros tipos no leñoso																					NA	
Matorral xerófilo leñoso																					NA	
Matorral xerófilo no leñoso																					NA	
Otras tierras																					NA	
Pastizal																					NA	
Selva caducifolia																					NA	
Selva perennifolia																					NA	
Selva subcaducifolia																					NA	
Vegetación hidrófila leñosa																					NA	
Vegetación hidrófila no leñosa																					NA	
Agua						Permanencia cuerpos de agua																
Total						Stock de cierre																

la aparición de bosques y selvas maduros en menos de cinco años, en un lugar donde no lo había anteriormente). En este sentido, estos cambios son entendidos como aquellos que ecológicamente son ilógicos y muy poco probables. Este tipo de cambios son el resultado de confusiones entre los insumos y los diferentes tipos de vegetación, y se interpretan como artefactos derivados de los propios sensores satelitales o de inconsistencias inevitables en la comparación de mapas por variaciones cartográficas y temáticas intrínsecas, incluso en la interpretación de los datos. En la matriz de cambios se señalan como imposibles los cambios de zona urbana a cualquier otra categoría. En el caso de los cuerpos de agua, debido a que estos se mantuvieron constantes después de aplicar una máscara de agua de extensión máxima, cualquier cambio entre cuerpos de agua a cualquier otra categoría, y viceversa, se consideran también cambios imposibles (NA en la figura 4-1).

Para la cuenta de extensión, se generó una matriz de cambio en la que se intersecan dos mapas en cada periodo analizado. De esta manera, se exploró la extensión de las transiciones entre categorías entre las ediciones de los mapas, así como para el lapso 2002-2014. Para generar estos datos, se llevó a cabo una sobreposición espacial por pares de mapas *raster*. Este nuevo *raster* de transiciones entre categorías o permanencia dio origen a una tabla de datos con la que finalmente se cuantificó la extensión de cada una de las transiciones o cambios en la extensión.

4.4 Resultados

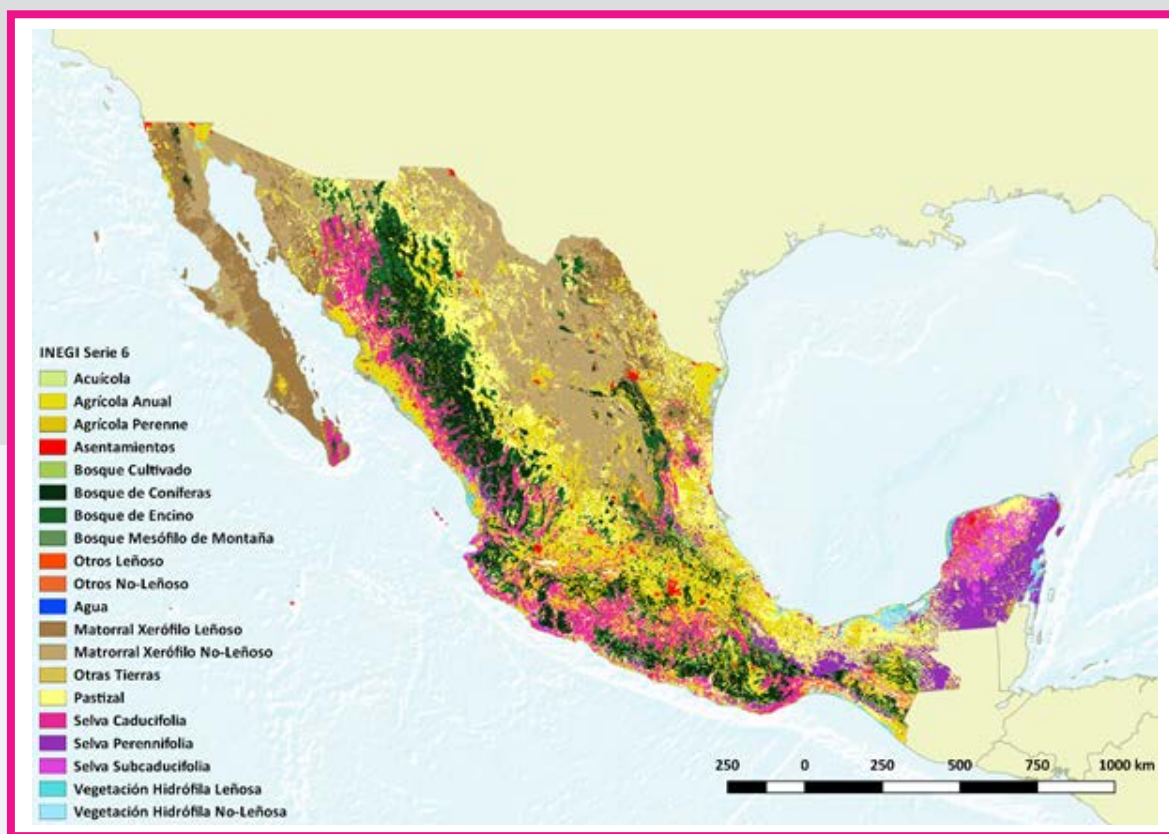
4.4.1 Extensión de los ecosistemas terrestres en México

De acuerdo con los datos de la serie VI de las CUSV (mapa 4-1), el ecosistema natural con mayor extensión en el país es el matorral xerófilo no leñoso (366 598 km², 19 % de la superficie total), seguido por los pastizales (308 219 km², 16 %) y el matorral xerófilo leñoso (205 651 km², 10 %). La selva caducifolia ocupa el cuarto lugar en extensión en el país (178 037 km², 9 %), seguida por los bosques de coníferas (167 826 km², 9 %) y los bosques de encino (158 295 km², 8 %).

Entre los ecosistemas de origen antrópico (categorías de uso de suelo), el más extenso es el agrícola anual (310 955 km², 16 %), seguido por la agricultura perenne (18 273 km², 1 %) y los asentamientos humanos (21 798 km², 1 %).

Cuadro 4-1. Extensión de los ecosistemas terrestres de acuerdo con la clasificación CONAFOR-IPCC-N3 agregados en 20 categorías en 2002, 2007, 2011 y 2014 (en km²)

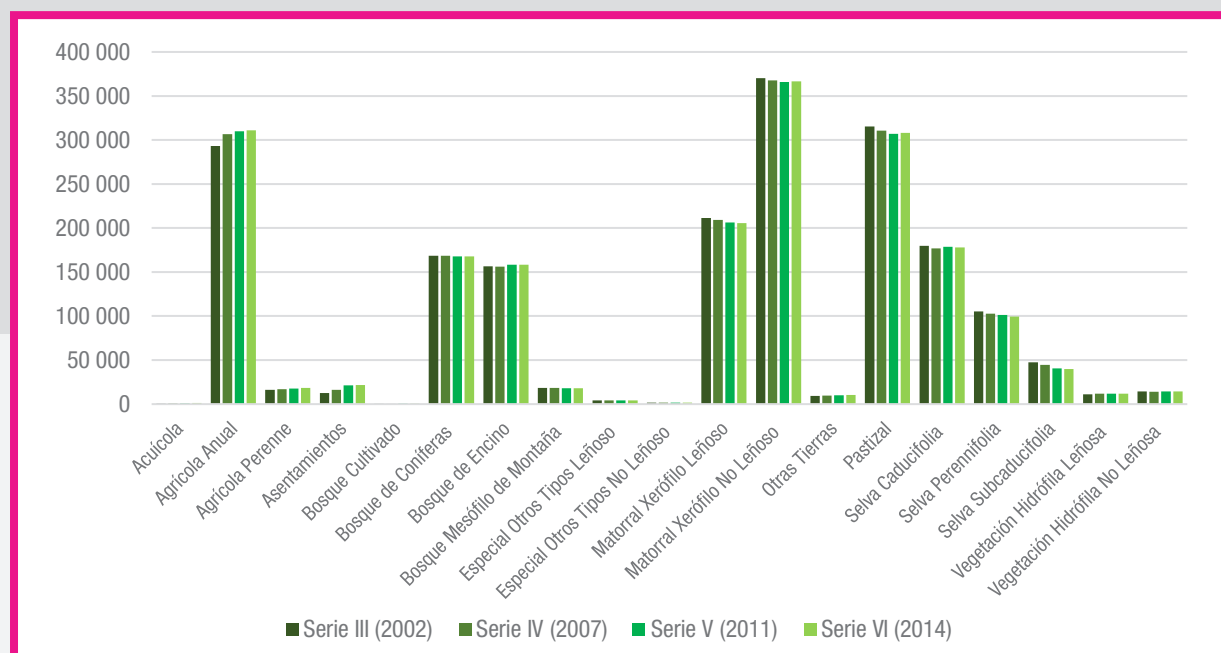
	Categoría	Serie III (2002)	Serie IV (2007)	Serie V (2011)	Serie VI (2014)	Porcentaje del total (2014)	Cambio neto (2002-2014)	Cambio porcentual (2002-2014)	Tasa de cambio anual (2002-2014)
Uso	Agrícola anual	293 268	306 675	309 811	310 955	16	17 687	6	0.49
	Asentamientos	12 657	16 045	21 400	21 798	1	9 142	72	4.63
	Agrícola perenne	16 239	16 840	17 671	18 273	1	2 034	13	0.99
	Acuícola	683	909	1 085	1 156	0	473	69	4.48
	Bosque cultivado	322	374	655	753	0	432	134	7.34
Ecosistemas naturales	Matorral xerófilo no leñoso	370 318	367 585	366 041	366 598	19	-3 719	-1	-0.08
	Pastizal	315 257	310 759	306 952	308 219	16	-7 038	-2	-0.19
	Matorral xerófilo leñoso	211 462	209 323	206 175	205 651	10	-5 811	-3	-0.23
	Selva caducifolia	179 643	176 845	178 802	178 037	9	-1 606	-1	-0.07
	Bosque de coníferas	168 673	168 358	167 905	167 826	9	-847	-1	-0.04
	Bosque de encino	156 366	156 248	158 350	158 295	8	1 929	1	0.10
	Selva perennifolia	105 222	102 838	101 422	99 436	5	-5 786	-5	-0.47
	Selva subcaducifolia	47 599	44 420	40 458	39 855	2	-7 744	-16	-1.47
	Bosque mesófilo de montaña	18 252	18 430	18 105	17 966	1	-286	-2	-0.13
	Vegetación hidrófila no leñosa	14 278	13 964	14 345	14 276	1	-2	0	0.00
	Vegetación hidrófila leñosa	11 290	11 680	11 752	11 737	1	447	4	0.32
	Otras tierras	9 493	9 742	10 165	10 279	1	785	8	0.66
	Especial otros leñoso	4 279	4 276	4 189	4 171	0	-108	-3	-0.21
	Especial otros no leñoso	1 562	1 544	1 541	1 537	0	-25	-2	-0.14
	Agua	27 548	27 548	27 548	27 548	1	0	0	0.00
Total		1 964 409	1 964 402	1 964 369	1 964 368				

Mapa 4-1. Extensión de los ecosistemas terrestres en México en 2014

Fuente: INEGI (2016).

De manera general, se observa una tendencia al incremento en la extensión de las clases de origen antrópico, como acuícola, agrícola anual y agricultura perenne, asentamientos humanos y bosque cultivado. Por el contrario, en el caso de los ecosistemas naturales, la tendencia es hacia una reducción en su extensión (figura 4-2).

Figura 4-2. Extensión de los ecosistemas naturales y de origen antrópico en km² durante el periodo de 12 años entre 2002 y 2014



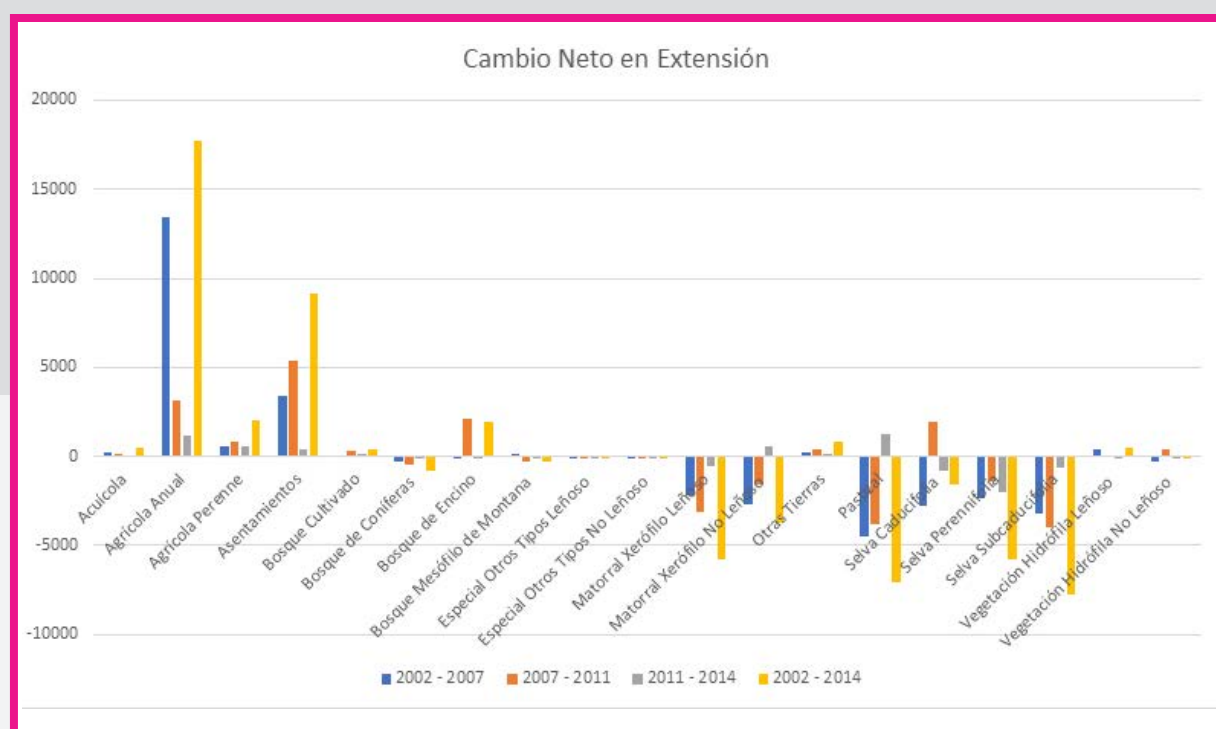
Fuente: elaboración propia a partir de las series de uso del suelo y vegetación del INEGI (2005, 2008, 2014, 2016).

4.4.2 Cambios en la extensión de los ecosistemas

Durante el periodo 2002-2014, todas las categorías correspondientes a ecosistemas de origen antrópico (o de uso de suelo) mostraron cambios netos y sostuvieron tasas de cambio positivas (cuadro 4-2; figuras 4-4 y 4-5). La categoría agrícola anual es la que presentó más incrementos entre 2002-2014, mostrando un aumento neto de 17 687 km² y una tasa de cambio anual de 0.49. Le siguió la de asentamientos humanos en área absoluta de adiciones, resultando en un cambio neto de 9 142 km² y una tasa de cambio anual de 4.63. Otras categorías que llaman la atención por sus altas tasas de cambio, a pesar de que su extensión es pequeña, son el bosque cultivado y la acuícola con tasas de cambio anuales de 7.34 y 4.48, respectivamente.

Por otro lado, prácticamente todas las categorías de vegetación natural mostraron cambios netos y tasas de cambio negativos durante 2002-2014, con excepción de otras tierras, vegetación hidrófila leñosa y no leñosa (cuadro 4-2; figuras 4-4 y 4-5). Destaca que el cambio neto y la tasa de cambio de los bosques de encino es casi cero. El pastizal mostró el cambio neto más negativo en el periodo de análisis, con una reducción neta de 7 038 km², lo que corresponde a más de 2 % de la extensión inicial con una tendencia clara de disminución en el tiempo (figura 4-3). Le siguieron los cambios netos negativos de la selva subcaducifolia (-7 744 km² o 16 % de la extensión inicial), el matorral xerófilo leñoso (-5 811 km² o 3 % de la extensión inicial) y la selva perennifolia (-5 786 km² o 6 % de la extensión de apertura). La selva caducifolia también mostró reducciones importantes (en total 1 606 km² o 1 % de la extensión inicial). Sin embargo, no hay un patrón a lo largo del tiempo, ya que este ecosistema presentó

Figura 4-3. Cambio neto de la extensión de los ecosistemas para los periodos 2002-2007, 2007-2011, 2011-2014 y 2002-2014



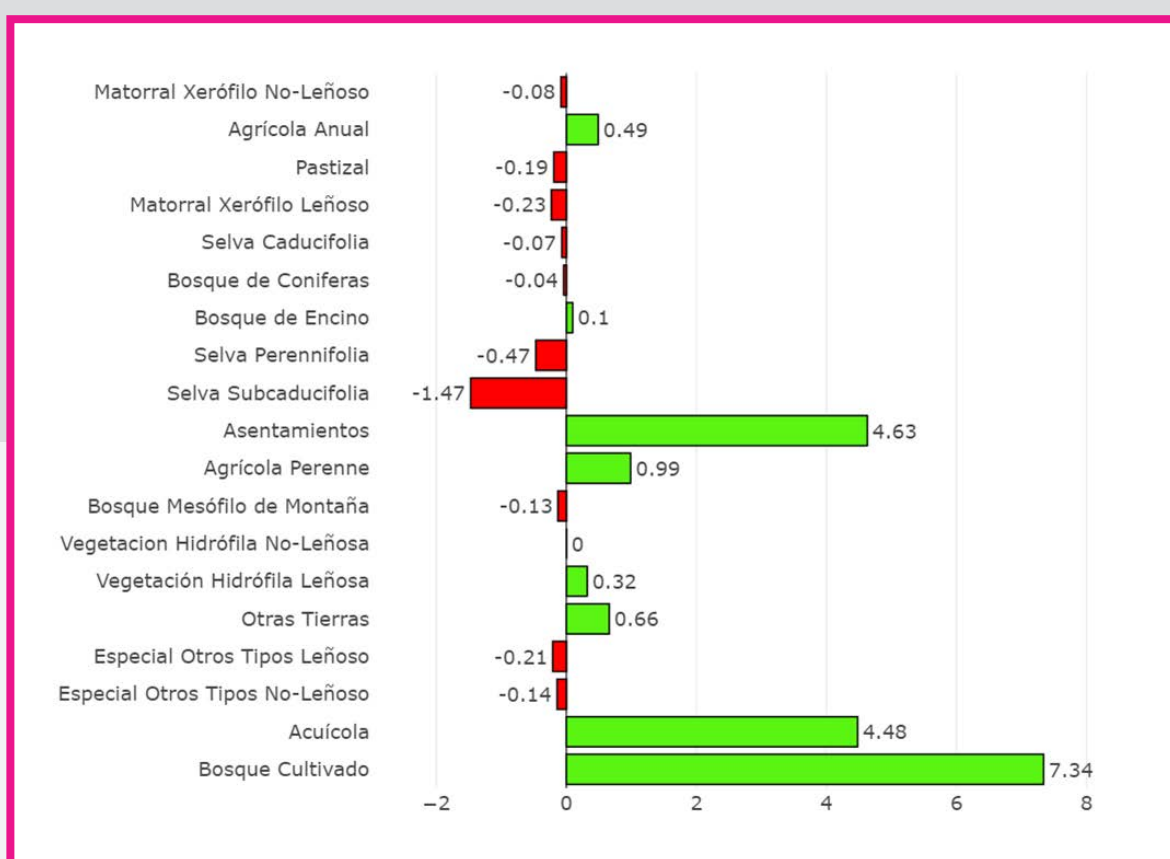
Fuente: elaboración propia a partir de las series de uso del suelo y vegetación del INEGI (2005, 2008, 2014, 2016).

Cuadro 4-2. Cuenta de la extensión de los ecosistemas terrestres para el periodo 2002-2014 utilizando las categorías agregadas de vegetación CONAFOR-IPCC-N3 (km²)

Series III -VI	Ecosistemas antrópicos (uso de suelo)				Ecosistemas naturales																
	Acuícola	Agrícola anual	Agrícola perenne	Asentamientos	Bosque cultivado	Bosque de coníferas	Bosque de encino	Bosque mesófilo de montaña	Especial otros tipos leñoso	Especial otros tipos no leñoso	Matorral xerófilo leñoso	Matorral xerófilo no leñoso	Otras tierras	Pastizal	Selva caducifolia	Selva perennifolia	Selva subcaducifolia	Vegetación hidrófila leñosa	Vegetación hidrófila no leñosa	Agua	Total
Extensión de apertura -2002 (Serie III)	683	293 268	16 239	12 657	322	168 673	156 366	18 252	4 279	1 562	211 462	370 318	9 493	315 257	179 643	105 222	47 599	11 290	14 278	27 548	1 964 409
Adiciones a stock																					
Expansión controlada	536	52 999	5 227	9 376	95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68 233
Expansión natural	0	0	0	0	389	9 485	14 158	1 430	668	80	4 734	7 594	1 477	45 897	19 902	8 855	3 292	1 414	1 785	0	121 161
Otras adiciones	0	129	10	2	5	4	4	0	0	10	11	15	11	39	6	9	2	7	5	0	267
Adiciones totales a stock	536	53 127	5 238	9 378	489	9 489	14 162	1 431	668	90	4 745	7 609	1 487	45 936	19 908	8 864	3 294	1 421	1 790	0	189 662
Reducciones en stock																					
Reducción controlada	11	7 062	1 351	0	30	3 495	2 830	807	280	57	4 095	6 312	196	23 723	8 838	4 563	4 229	231	512	0	68 622
Reducción natural	52	28 376	1 845	0	27	6 841	9 403	909	496	50	6 458	5 011	482	29 247	12 674	10 086	6 810	731	1 274	0	120 772
Otras reducciones	0	3	7	236	0	0	0	0	0	8	3	5	24	4	1	0	0	11	6	0	308
Reducciones totales en stock	63	35 440	3 203	236	57	10 336	12 233	1 716	775	115	10 555	11 328	702	52 974	21 514	14 649	11 039	973	1 792	0	189 703
Ajustes contables	0	126	3	- 234	5	4	4	0	0	2	8	9	- 13	35	5	9	2	- 4	- 1	0	- 41
Extensión de cierre -2014 (Serie VI)	1 156	310 955	18 273	21 798	753	167 826	158 295	17 966	4 171	1 537	205 651	366 598	10 279	308 219	178 037	99 436	39 855	11 737	14 276	27 548	1 964 368
Cambio neto en km²	473	17 687	2 034	9 142	432	- 847	1 929	- 286	- 108	- 25	- 5 811	- 3 719	785	- 7 038	- 1 606	- 5 786	- 7 744	447	- 2	0	- 41
Cambio porcentual	69 %	6 %	13 %	72 %	134 %	- 1 %	1 %	- 2 %	- 3 %	- 2 %	- 3 %	- 1 %	8 %	- 2 %	- 1 %	- 5 %	- 16 %	4 %	0 %	0 %	0 %
Tasa de cambio anual	4.48	0.49	0.99	4.63	7.34	- 0.04	0.10	- 0.13	- 0.21	- 0.14	- 0.23	- 0.08	0.66	- 0.19	- 0.07	- 0.47	- 1.47	0.32	0.00	0.00	0.00

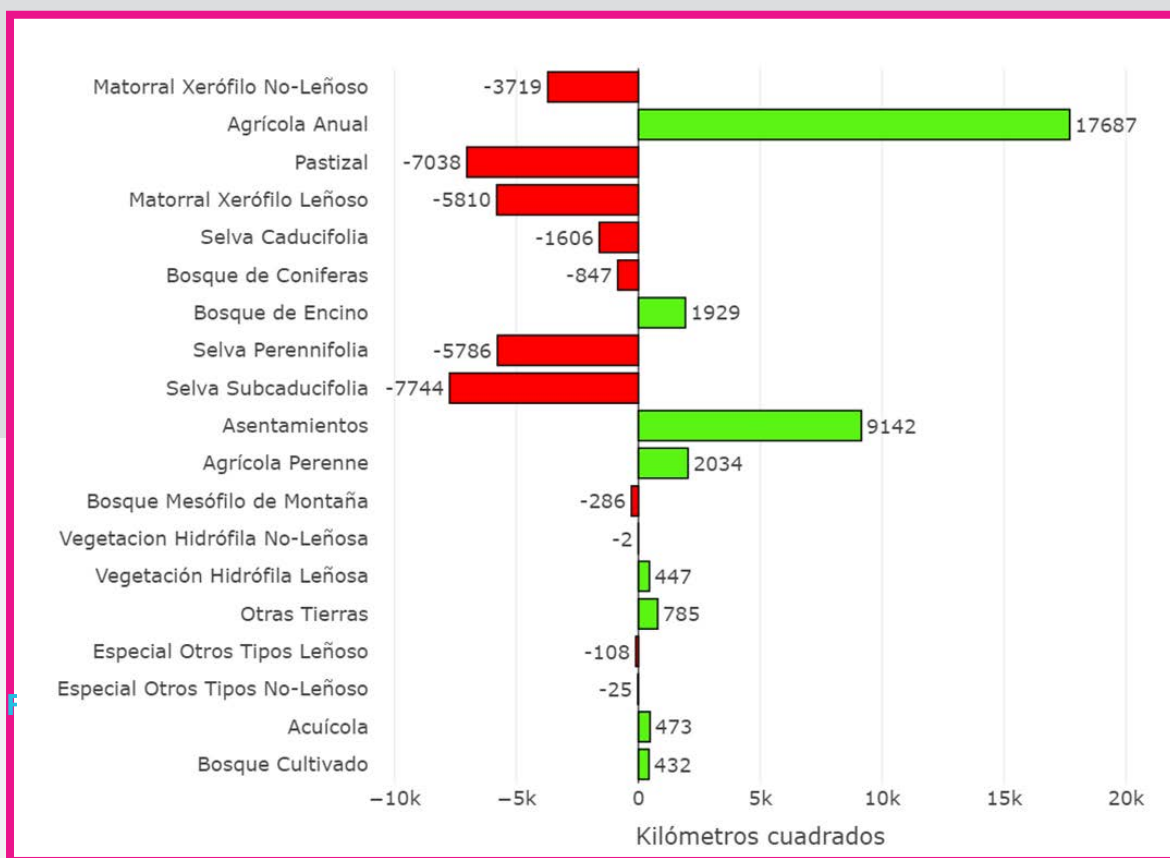
aumentos importantes en el lapso 2007-2011 (figura 4-3). Durante el periodo comprendido entre 2002 y 2014, la **tasa de cambio** más negativa la tuvo la **selva subcaducifolia** (en total -1.47) seguido por la selva perennifolia (-0.47) (cuadro 4-2, figura 4-4). Otras categorías con tasas de cambio negativas considerables son especial otros tipos leñoso y no leñoso (-0.22, -0.27), así como el matorral xerófilo (-0.24). En los bosques se observa un alto dinamismo que resulta en un balance cercano a cero, con excepción del bosque mesófilo de montaña, que mostró una reducción un poco mayor (tasa de cambio total -0.13). De manera general, se aprecia una disminución de las adiciones y reducciones a través del tiempo, sobre todo para el periodo 2011-2014. A pesar de esto, en este periodo se vuelve evidente la fuerte tendencia a la baja de las selvas tropicales, sobre todo la caducifolia y la subcaducifolia, respecto a otros tipos de ecosistemas.

Figura 4-4. Tasa de cambio anual de ecosistemas entre 2002 y 2014



Fuente: INEGI (2005, 2016).

Figura 4-5. Cambio neto de extensión de ecosistemas entre 2002 y 2014



Fuente: INEGI (2005, 2016).

4.4.3 Vegetación potencial

Para dar mayor contexto histórico a las cuentas de extensión, se calculó la proporción remanente de cada tipo de ecosistema considerando el horizonte hipotético sin intervención humana, recurriendo a la vegetación potencial de México (Rzedowski, 1990). Esta describe la vegetación que probablemente cubría el territorio nacional antes de ser transformada por las actividades humanas. La escala y clasificación de esta carta difieren de aquellas asociadas a las cartas de vegetación y uso del suelo utilizadas en las series del INEGI y que se han analizado en las secciones anteriores. No obstante, a pesar de estas limitaciones, es posible realizar una comparación hipotética entre ellas con el propósito de tener una estimación gruesa de los cambios que se han presentado en los ecosistemas nacionales con base en un mapa de referencia (cuadro 4-3).

Las cifras sugieren que las selvas mexicanas, en su conjunto, son los ecosistemas que más han reducido su extensión respecto a la original. En 2014, la selva caducifolia habría sido el

Cuadro 4-3. Vegetación remanente en 2014 respecto a la extensión potencial de los ecosistemas, en km² (CONAFOR-IPCC-N3, agregada a ocho clases)

Categorías de vegetación		Extensión (km ²)		Porcentaje
Vegetación potencial	CONAFOR-IPCC-N3	Vegetación potencial	Vegetación serie VI-2014	Vegetación remanente
Bosque tropical caducifolia/ bosque espinoso	Selva caducifolia	381 580	178 037	47
Bosque tropical perennifolio	Selva perennifolia	189 234	99 436	53
Bosque tropical subperennifolio	Selva subcaducifolia	54 667	39 855	73
Matorral xerófilo	Matorral xerófilo	727 848	572 283	79
Bosque de coníferas y encinos	Bosque de coníferas y bosque de encino	377 347	326 121	86
Bosque mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña	17 836	17 966	101
Vegetación acuática y subacuática	Vegetación hidrófila	20 336	26 013	128
Pastizal	Pastizal	157 075	308 219	196

Nota: debido a que la vegetación potencial no incluye uso del suelo, las categorías correspondientes no fueron tomadas en cuenta, al igual que las clases especial leñoso y especial no leñoso y otras tierras por no tener correspondencias en vegetación potencial; además, estas categorías representan una porción muy pequeña del territorio.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de vegetación potencial a escala 1:4 000 000 (Rzedowski, 1990) y la Carta de vegetación. *Serie VI* del INEGI.

ecosistema más reducido al conservar únicamente 47 % de su superficie original. Le seguían la perennifolia y la subcaducifolia, las cuales conservaban 53 y 73 % de su extensión original, respectivamente. Los bosques de coníferas y de encino mantenían 86 % de su superficie original. En el caso del bosque mesófilo de montaña, aunque existen evidencias documentadas de la disminución de su extensión en México, en este trabajo no se observaron pérdidas respecto a lo representado en la vegetación potencial; sin embargo, hay que considerar que, por la escala de los insumos, este ecosistema, disjunto en áreas relativamente pequeñas y en vecindad entremezclada con otros tipos de bosques, muy probablemente no esté adecuadamente representado. Lo mismo aplica para la vegetación hidrófila que mostró un incremento de 29 por ciento. En cuanto al pastizal, el aumento podría deberse a la apertura de ecosistemas naturales y su transformación en pastizales para el desarrollo de actividades agropecuarias, sobre todo para la práctica de la ganadería. Desafortunadamente, la clasificación de vegetación CONAFOR-IPCC-N3 no permite realizar una comparación en términos del origen natural o antrópico de los pastizales. Por lo anterior, estas cifras se deben tomar con cautela.

4.4.4 Matrices de cambio

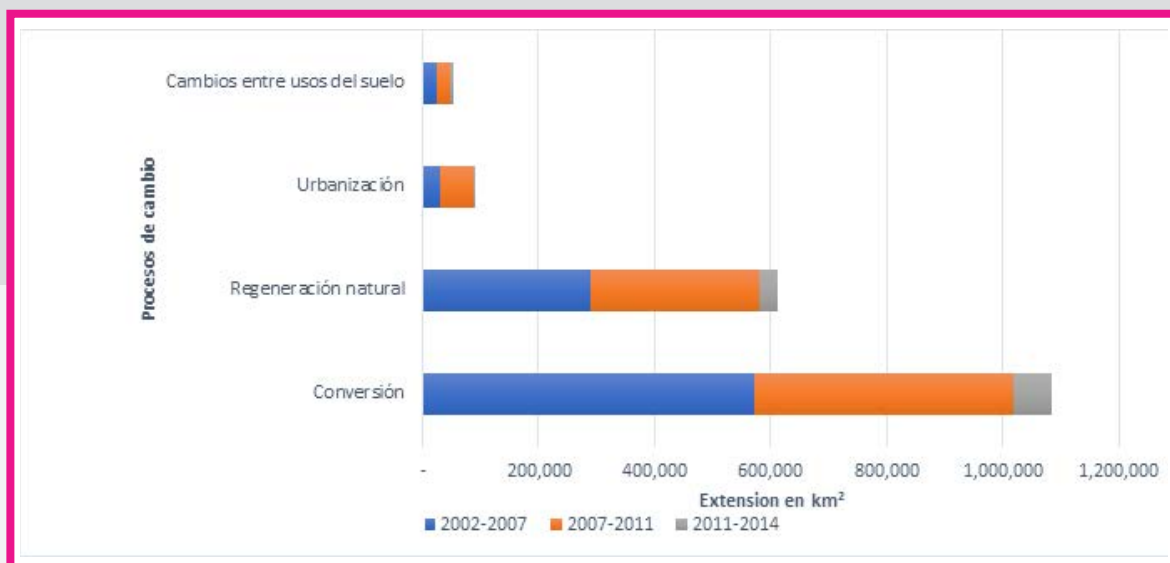
En las matrices de cambio se observa una menor dinámica de cambios entre ecosistemas a través del tiempo. Esto afecta a todos los procesos de cambios, como el cambio entre usos del suelo, urbanización, regeneración natural y conversión (figura 4-6). Este patrón general no contradice el desarrollo contrario para algunos tipos de vegetación arriba mencionando.

La conversión de ecosistemas naturales en alguna categoría de uso del suelo fue el proceso de cambio más extenso, abarcando un poco más de 3 % del territorio, mientras que la **regeneración natural** comprendió la mitad de esa extensión (cuadro 4-5). Esto indica una pérdida importante de ecosistemas naturales a pesar de existir también un intercambio constante entre áreas deforestadas y regeneradas.

4.4.4.1 Dinámica de cambios, 2002-2014

En el periodo de 12 años comprendido entre 2002-2014, entre las transiciones resultantes por conversión de ecosistema natural a antrópico (uso de suelo), destacaron las de la selva caducifolia, seguida de la subcaducifolia y perennifolia hacia agricultura anual, principalmente; no obstante, los bosques de coníferas, de encino y mesófilo mostraron casi la misma propor-

Figura 4-6. Extensión de los principales procesos de cambio durante los periodos 2002-2007, 2007-2011 y 2011-2014



ción de áreas convertidas, tomando en cuenta su menor extensión natural. En este sentido, también para la vegetación especial se detectó una conversión alta (cuadro 4-4). La conversión de los matorrales leñosos resultó comparable con la de la selva perennifolia, mientras que la de los matorrales no leñosos fue más alta (entre la magnitud de conversión de las selva subcaducifolia y caducifolia). En el caso de la vegetación hidrófila, la conversión de vegetación hidrófila no leñosa fue el doble que la hidrófila leñosa (cuadro 4-4). La regeneración natural de manera general fue mucho menor que la conversión, causando una reducción de ecosistemas naturales. Solo los bosques de coníferas y mesófilo fueron transformados principalmente a áreas dedicadas a la agricultura perenne en mayor magnitud que los bosques de encino; a su vez, los bosques de coníferas fueron transformados en áreas urbanas en mayor magnitud que los otros tipos de bosques. El matorral xerófilo leñoso presentó una conversión más alta hacia asentamientos, mientras que el no leñoso tuvo una mayor conversión hacia agricultura anual. Las selvas, particularmente la perennifolia, son las que más han sufrido cambios por conversiones a agricultura perenne, sobre todo la perennifolia, pero también por asentamientos en comparación con los bosques. También, se observaron transiciones correspondientes a cambios entre usos del suelo, evidenciando una dinámica importante entre cultivos anuales y perennes (cuadro 4-4). En las transiciones a asentamientos dominó el cambio de agrícola anual a asentamientos humanos.

Cuadro 4-4. Matriz de cambio para el periodo 2002-2014 en km²

		Ecosistemas antropicos (uso de suelo)					Ecosistemas Naturales Terrestres															Total extensión de apertura 2002 (Serie III)		
		Acuícola	Agrícola anual	Agrícola perenne	Asentamientos	Bosque cultivado	Bosque de pifreñas	Bosque de encino	Bosque mesófilo de montaña	Especial Otros tipos leñoso	Especial otros tipos no leñoso	Matorral xerófilo leñoso	Matorral xerófilo no leñoso	Otras tierras	Pastizal	Selva caducifolia	Selva perennifolia	Selva subcaducifolia	Vegetación Hidrófila leñosa	Vegetación hidrófila no leñosa	Agua		Ajustes	
2002 Serie III	2014 Serie VI	Acuícola	620	10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	683
		Agrícola anual	20	257 828	1 810	5 161	71	2 972	2 557	265	128	2	2 005	3 143	131	8 305	6 833	1 012	638	204	180	NA	3	293 268
		Agrícola perenne	1	995	13 036	331	24	134	27	52	1	2	39	8	19	840	388	257	30	35	14	NA	7	16 239
		Asentamientos	0	128	6	12 421	5	4	4	0	0	1	10	14	5	36	6	8	2	6	1	NA	2	12 657
		Bosque cultivado	0	16	0	14	265	7	6	0	0	0	2	0	0	5	0	6	0	0	0	NA	0	322
		Bosque de coníferas	0	3 059	268	83	85	158 337	3 363	338	2	0	30	8	16	2 666	358	10	51	1	0	NA	0	168 673
		Bosque de encino	0	2 701	48	49	31	2 766	144 133	139	33	0	89	26	84	3 565	2 444	87	164	8	0	NA	0	156 366
		Bosque mesófilo de montaña	0	588	196	24	0	301	38	16 535	0	0	2	0	2	473	3	83	7	0	0	NA	0	18 252
		Especial otros tipos leñoso	0	267	2	9	1	8	110	0	3 503	0	130	57	3	108	66	5	3	3	3	NA	0	4 279
		Especial otros tipos no leñoso	10	12	3	32	0	0	0	0	1 447	5	4	11	6	2	1	0	21	1	1	NA	8	1 562
		Matorral xerófilo leñoso	86	3 309	96	604	0	286	184	0	25	8	200 907	784	167	4 723	172	0	24	64	21	NA	3	211 462
		Matorral xerófilo no leñoso	200	5 647	60	404	1	48	251	0	160	5	696	358 989	494	3 106	1	0	0	160	91	NA	5	370 318
		Otras tierras	57	82	19	37	1	39	3	0	0	16	13	138	8 791	128	11	10	1	89	35	NA	24	9 493
		Pastizal	28	20 099	1 695	1 685	216	2 533	5 404	332	215	13	1 594	3 148	287	262 283	7 926	5 521	1 253	271	751	NA	4	315 257
		Selva caducifolia	13	8 039	345	437	3	304	1 827	3	63	1	88	195	153	9 202	158 129	106	617	91	25	NA	1	179 643
Selva perennifolia	0	3 656	509	356	42	18	113	158	1	0	0	0	0	27	8 734	175	90 573	471	85	306	NA	0	105 222	
Selva subcaducifolia	0	4 010	125	85	10	69	272	143	2	0	0	0	6	3 376	1 453	1 426	36 561	31	32	NA	0	47 599		
Vegetación hidrófila leñosa	16	166	17	34	0	0	2	0	1	30	34	21	47	96	29	114	31	10 316	327	NA	11	11 290		
Vegetación hidrófila no leñosa	106	342	35	30	0	0	2	0	38	2	7	17	30	565	42	218	4	349	12 486	NA	6	14 278		
Agua	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	27 548	0	27 548		
Ajustes	0	1	5	2	0	0	0	0	0	10	1	0	6	3	0	0	0	2	4	0	0	0	0	
Total extensión de cierre 2014 (Serie VI)		1 156	310 955	18 273	21 798	753	167 826	158 295	17 966	4 171	1 537	205 651	366 598	10 279	308 219	178 037	99 436	39 855	11 737	14 276	27 548	1 964 368		

Nota: las cifras en gris representan los cambios imposibles; las filas, el tiempo inicial; y las columnas, el tiempo final de tal manera que la cantidad en cada celda representa la cantidad que pasó de una categoría del tiempo inicial (fila) a otra en el final (columna); las celdas blancas en diagonal representan las permanencias de cada categoría.

Cuadro 4-5. Proporción del territorio cubierto por los procesos de cambio y los cambios imposibles

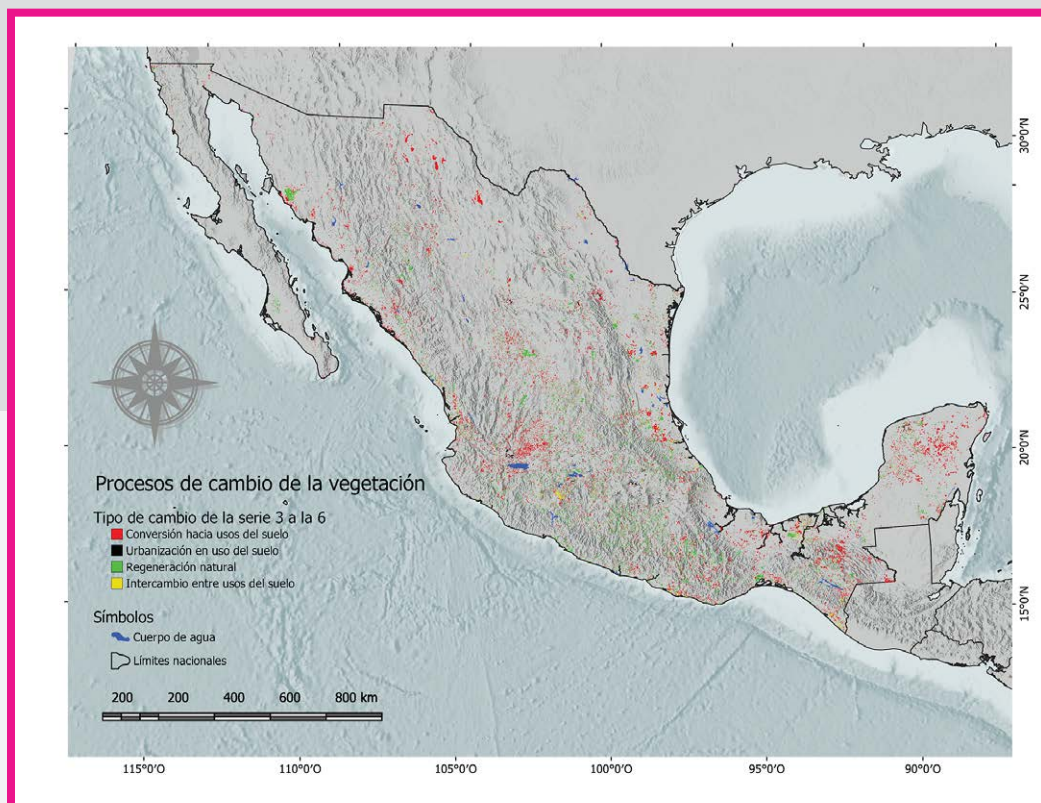
Procesos de cambio (2002-2014)	Área (km ²)	Porcentaje total del territorio
Conversión: pérdida de vegetación natural	60 168	3.1
Regeneración natural	30 300	1.5
Urbanización	5 507	0.3
Intercambio en usos de suelo	2 963	0.2
Cambios imposibles	Área (km ²)	Porcentaje total del territorio
Intercambio vegetación	90 471	4.6
Asentamientos	234	0.0

Con el objetivo de profundizar en el análisis de cambios, también se elaboraron matrices de cambio para cada uno de los periodos contables intermedios con la información de las series de uso del suelo y vegetación descritas en este capítulo. Este tipo de análisis es importante para ver las tendencias en los cambios a través del tiempo, ya que varios tipos de ecosistemas muestran un comportamiento oscilatorio entre cada uno de los periodos.

Considerando los diferentes lapsos de análisis, en la mayoría de los ecosistemas no existe un patrón claro, ya que hay pérdidas y ganancias considerables a través de los años. Por ejemplo, la selva caducifolia mostró reducciones importantes durante 2002-2014; sin embargo, también presentó aumentos importantes en el lapso 2007-2011. En general, las mayores inconsistencias en tendencias de extensión se presentaron en el periodo 2007-2011. El análisis de cambios y las matrices de cambio correspondientes a los lapsos de análisis 2002-2007, 2007-2011 y 2011-2014 se encuentran en el *Anexo 9.5*.

A la escala nacional, los procesos de cambio correspondieron a un poco más de 5 % de todo el territorio en el periodo 2002-2014 (mapa 4-2). La conversión de ecosistemas naturales a ecosistemas de uso antrópico, sobre todo a agrícola anual, representan el cambio con mayor extensión (cuadro 4-5). La regeneración natural comprendió prácticamente la mitad de la extensión de conversión, indicando una pérdida importante de ecosistemas naturales, a pesar de existir también un intercambio constante entre áreas convertidas y regeneradas. También, se puede destacar que la extensión de la urbanización fue casi el doble que el intercambio entre diferentes tipos de uso del suelo (cuadro 4-5). Aquí es importante enfatizar la necesidad de controlar los cambios imposibles por errores en los mapas, ya que en este caso el conjunto de los cambios imposibles representa 4.6 % respecto de la superficie total del país.

Mapa 4-2. Mapa de cambios en extensión de ecosistemas entre 2002 y 2014



Fuente: elaboración propia.

4.5 Discusión

Los bosques y selvas del mundo son importantes para la sociedad en general por proveer insumos directos y materias primas industriales, por sus funciones ecológicas que contribuyen a disminuir la erosión tanto eólica como hídrica, eliminan el bióxido de carbono del aire, reducen el calentamiento del planeta, regulan el régimen de lluvias, favorecen la recarga de los acuíferos y preservan la biodiversidad de la flora y la fauna (Sánchez-Ramos y Dirzo, 2014), entre otros.

En el marco del SEEA, una vez realizada la clasificación de los ecosistemas, se estima su extensión en diferentes momentos o fechas. Esta cuenta proporciona la base para la evaluación y posterior análisis de la condición del ecosistema.

La estimación de la extensión de los ecosistemas realizada con base en cuatro de las series de vegetación y uso del suelo desarrolladas por el INEGI (2002, 2005, 2011 y 2014) reflejan los cambios en los principales ecosistemas de México a través del tiempo y pueden ser aprovechados en la construcción de políticas públicas para el manejo del patrimonio natural (SEMARNAT, 2016). Aunque los cambios presentados obedecen más a una dinámica sucesional donde, por un lado, la vegetación de un ecosistema es transformada a otro tipo de ecosistema como consecuencia de algún disturbio ya sea natural o antropogénico, posiblemente el ecosistema original pueda ser recuperado a través de la sucesión ecológica; el periodo que existe entre las series de vegetación difícilmente permitirá generar conclusiones de este tipo, salvo en el caso de las selvas bajas, donde su alto dinamismo puede permitir la medición de su recuperación (Argumedo-Espinoza *et al.*, 2017) a lo largo de 12 años, tiempo transcurrido entre las series III y VI. Caso contrario es la transformación de pastizales y áreas agrícolas (como caso más representativo) en zonas urbanas, donde prácticamente es imposible la recuperación de un ecosistema natural.

Las mayores conversiones de ecosistemas naturales a antrópicos se presentaron en los ecosistemas de selvas, aunque los bosques de coníferas, de encino y mesófilos también se vieron afectados; en el primer caso, probablemente la transformación haya sido hacia los pastizales, donde, al disminuir la intensidad de la perturbación ocurrirá una recuperación, principalmente secundaria. En el segundo, es necesario el diseño de estrategias de manejo adecuado que permita la recuperación de la cubierta forestal (restauración pasiva, restauración activa, plantaciones agrícolas, entre otras; Del Ángel-Mobarak, 2012).

4.6 Conclusiones

Las cuentas de extensión de los activos de los ecosistemas proveen información relevante al integrar varias capas de información geoespacial y constituyen el marco estadístico y espacial para la compilación de las otras cuentas de ecosistemas. La cuenta de extensión permite visualizar el tamaño y la distribución de los diferentes tipos de ecosistemas en todo el territorio, su dinámica y las principales transiciones ecológicas durante el periodo 2002-2014. Los ecosistemas con mayor extensión a 2014 son el matorral xerófilo no leñoso seguido por los pastizales, el matorral xerófilo leñoso, la selva caducifolia, los bosques de coníferas y los bosques de encino (19, 16, 10, 9, 9 y 8 % de la superficie total del país, en ese orden). Potencialmente, las selvas mexicanas son las formaciones vegetales que más han disminuido su extensión original (53 % aproximadamente). El análisis a partir del uso de matrices de cambio

permitió la identificación de procesos e indicadores de conversión y regeneración. De manera general, existe una tendencia al incremento en la extensión de las clases de origen antrópico, como: las áreas acuícolas, la agricultura anual y la agricultura perenne, el bosque cultivado y los asentamientos humanos. Los principales resultados de estos procesos son muy útiles para priorizar las zonas donde están ocurriendo esos cambios, brindando más información para la toma de decisiones a diferentes niveles, los cuales se traducen en el diseño de prácticas de manejo para la conservación del patrimonio natural.

4.6.1 Áreas de oportunidad y recomendaciones

La clasificación CONAFOR-IPCC-N3 se utilizó como *proxy* de la clasificación *Global Ecosystem Typology* y permitió sintetizar los tipos de vegetación facilitando el análisis de su extensión y distribución y sirvió como el marco por la cuenta de extensión. Por lo anterior, se considera importante abordar el trabajo de una clasificación nacional específica para los ecosistemas de manera coordinada aprovechando la experiencia de los científicos y académicos de distintas instituciones e investigadores especializados en el tema, como CONABIO, CONAFOR, CONANP, SEMARNAT, INECOL e INEGI, entre otros. Esta clasificación debe guardar coherencia con la propuesta de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés), que fue adoptada como parte del SEEA EA.

En lo particular se recomienda:

- Desarrollar una clasificación donde se puedan diferenciar los tipos de ecosistemas naturales de aquellos que no lo son, como en el caso de los pastizales. En este sentido, es recomendable contar con cartografías que permitan distinguir claramente los ecosistemas naturales. En cuanto a los pastizales, es fundamental desagregar los naturales de los cultivados o inducidos, ya que dificulta el análisis de los procesos naturales y la identificación de las actividades de pastoreo y ganadería.
- Para la elaboración de las cuentas de extensión, se sugiere no mezclar características de condición con las de extensión de los ecosistemas. Debido a que los cambios de vegetación primaria a secundaria en un ecosistema son producto de la sucesión ecológica, no deben ser considerados como cambios de extensión sino, más bien, como de condición, pues reflejan un cambio en el estado de salud de un ecosistema determinado, lo que no necesariamente implica un cambio en el tipo de vegetación, pero si uno en su estructura vertical y horizontal.

- Trabajar en mejorar la confiabilidad de los insumos para lograr mayor certidumbre en el análisis de cambios. En este sentido, se sugiere profundizar en la discusión sobre cambios imposibles con base en conocimiento experto y con vistas a mejorar la identificación de la causa del origen de los cambios para poder clasificarlos en antrópicos o naturales, según sea el caso.
- La contabilidad de ecosistemas requiere de información espacialmente explícita, por lo que es necesario asegurar y fortalecer la actualización de los datos necesarios para la elaboración de las cuentas tanto con información geoespacial estandarizada como con mayor cobertura temporal. También, es recomendable continuar con una representación de la información en formato de celdas (*raster*) que facilite su organización y manejo.
- Desarrollar un clasificador nacional de ecosistemas con el fin de poder lograr una identificación y caracterización específica de los ecosistemas del país. La base para la clasificación proviene del sistema jerárquico de vegetación del INEGI, que es un excelente punto de inicio para clasificar ecosistemas; sin embargo, sería aconsejable explorar la posibilidad de incorporar elementos bióticos y abióticos que aporten más información ecológica y así desarrollar una clasificación nacional de ecosistemas que no solo tome en cuenta la estructura de la vegetación, sino también otros componentes ecológicos y biofísicos.
- Sería conveniente que las cuentas de extensión (y las cuentas de los ecosistemas en general) se puedan elaborar a nivel subnacional con el objetivo de mejorar el nivel de análisis para la toma de decisiones.

Es importante destacar la relevancia de trabajar de manera colegiada en el desarrollo de un programa de trabajo común que incorpore:

- La información que dispone el sector ambiental trabajada *ex profeso* de manera que sea un insumo directo para el proceso de recopilación de las cuentas.
- Que se aprovechen adecuadamente las capacidades técnicas de los científicos, los esfuerzos de los expertos nacionales, así como el intercambio de información con las diferentes instituciones, como CONABIO, CONAFOR, CONANP, SEMARNAT, INECOL e INEGI, entre otras en el marco del SNIEG, que cuenta con instrumentos de coordinación interinstitucional para desarrollar un programa de trabajo en común y un esquema transversal.

5 Cuentas de condición de los ecosistemas terrestres de México

Estas proporcionan un enfoque estructurado para registrar y agregar datos que describen las características de los activos del ecosistema y sus cambios. Para el caso de México, la condición de los ecosistemas se cuantifica con base en características del estado estructural y funcional de estos y una medida agregada a través del Índice de Integridad Ecosistémica (IIE).

Además, se presenta una medida de la extensión efectiva que pondera la extensión (calculada en el *Capítulo 4*) en función de su condición y el Índice de Capital Natural (ICN), que evalúa la extensión efectiva relativa al área original contenida en cada ecosistema.

Mensajes clave

Contabilizar la condición de los ecosistemas puede ofrecer un nuevo marco de referencia para conducir el desarrollo del país. A través de esta contabilidad, la toma de decisiones podrá llevarse a cabo considerando los beneficios económicos y sociales, la provisión de servicios ecosistémicos que proporcionan los activos de los ecosistemas y, además, la capacidad que estos tienen para mantenerse en funcionamiento.

La metodología utilizada en este estudio piloto está basada en la combinación de un modelo conceptual y técnicas de inteligencia artificial, y ofrece una oportunidad para aprovechar la enorme cantidad de datos generados por distintas instituciones bajo un enfoque integral.

Resulta pertinente evaluar la posibilidad de incorporar nuevas variables o indicadores al Índice de Integridad Ecosistémica. Sería necesario hacer una evaluación sobre la viabilidad de estas variables e indicadores para que cumplan con los criterios establecidos por el SEEA EA. En esta discusión se debe incluir la participación de las instituciones encargadas de la producción de variables e indicadores y garantizar la recopilación de datos en el tiempo. Dentro de estas variables se deben considerar aquellas que midan características físicas, faunísticas y a nivel de paisaje, e integrarlas causalmente con variables de presión que favorezcan la integridad.

Resultados relevantes

La contabilidad de las variables para cada tipo de ecosistema indica que entre 2004 y 2018 hubo cambios importantes en algunas variables estructurales (porcentaje de crecimiento arbóreo tropical y arbustivo), funcionales (fotosíntesis neta) y de presión (porcentaje cubierto por asentamientos humanos).

La condición de los ecosistemas en México es heterogénea a lo largo del territorio (2018). Las regiones con mayor integridad ecosistémica se encuentran, principalmente, en el norte del país, con excepción de las costas de Sonora, Sinaloa y Nayarit, así como una región en la zona árida del norte de México. Las zonas con menor integridad ecosistémica están en la planicie costera del Golfo de México, en el Bajío y en las costas del Pacífico norte (Sonora, Sinaloa y Nayarit).

Los ecosistemas terrestres de México han perdido una gran extensión. El remanente de esta aún es considerable y en algunos ecosistemas naturales su condición es alta. El matorral xerófilo no leñoso es el ecosistema natural más extenso (366 598 km²) y el que se encuentra en mejor condición. Los pastizales son muy extensos, pero con una condición baja.⁸ El matorral xerófilo leñoso ocupa el cuarto lugar en cuanto a extensión y, también, en su mayoría se encuentra con buena integridad. Aunque en menor magnitud, los bosques de coníferas y encino también presentan una extensión importante e integridad ecosistémica relativamente alta. El bosque mesófilo actualmente ocupa una extensión reducida y su integridad es entre media y muy alta.

Los usos de suelo antrópicos pueden ser extensos y naturalmente los espacios donde se presentan tienen integridades muy bajas. La clase agrícola anual tiene la mayor extensión dentro de los usos de suelo con una integridad muy reducida. La extensión de los asentamientos humanos ya es mayor que la de algunos ecosistemas (por ejemplo, el bosque mesófilo de montaña) y muestra los valores más bajos de integridad.

La distribución estandarizada de la integridad ecosistémica agregada de acuerdo con las categorías de vegetación CONAFOR-IPCC-N3 nos permite hacer distintas comparaciones. Entre 40 y 60 % de la extensión del matorral xerófilo no leñoso, matorral xerófilo leñoso, la vegetación hidrófila leñosa e hidrófila no leñosa, el bosque de coníferas, la selva perennifolia, el bosque de encino y el bosque mesófilo de montaña tienen una integridad elevada. Aproximadamente, 25 % de la superficie de la selva caducifolia y alrededor de 10 % de la subcaducifolia se encuentran con valores altos de integridad. De la extensión de los asentamientos humanos, 70 % tiene una integridad ecosistémica muy baja. Alrededor de 20 % de las zonas agrícolas anuales y perennes están con integridad ecosistémica muy baja. La integridad ecosistémica de los bosques cultivados es heterogénea, en su mayoría en niveles moderados.

8 Es importante notar que la categoría pastizal incluye pastizales de origen natural y antrópico.

La extensión efectiva se define como el producto de la extensión de un ecosistema multiplicado por su condición (integridad). En algunos tipos de vegetación se ha reducido notablemente debido a la pérdida de integridad. Por ejemplo, al considerar la integridad, el pastizal se redujo en 2018 en 50 %, al pasar de 308 219 km² (extensión) a 160 753 km² (extensión efectiva).

El ICN representa en una escala de 0 a 1 el remanente de capital natural en un área de interés o área de contabilidad de ecosistemas (i. e., país, cuenca, estado, municipio, etcétera). El Índice se obtiene relativizando la extensión efectiva en función del área de contabilidad.

A nivel nacional, México mantiene 65 %⁹ de su capital natural terrestre original. Porcentualmente, los ecosistemas naturales que mayor capital natural mantienen son el matorral xerófilo no leñoso (87 %), el matorral xerófilo leñoso (85 %) y el bosque de coníferas (83 %). La selva caducifolia, el bosque de encino, la selva perennifolia, la selva subcaducifolia, el bosque mesófilo de montaña y la vegetación hidrófila leñosa y no leñosa mantienen entre 70 y 80 % de su capital natural. Aunque el bosque mesófilo de montaña y la vegetación hidrófila leñosa y no leñosa poseen una extensión reducida a nivel nacional, constituyen ecosistemas de mucha importancia. Los ecosistemas naturales que menor capital natural conservan son: otras tierras (64 %), especial otros tipos no leñosos (65 %), selva subcaducifolia (71 %) y selva caducifolia (73 %). El capital natural contenido en el pastizal es de 52 % (ver nota 8 a pie de página). Los usos de suelo que mayor capital natural conservan son el bosque cultivado (55 %), el acuícola (51 %) y el agrícola perenne (41 %). Los asentamientos solo conservan 9 %; la agricultura anual, 35 %; y la agricultura perenne, 41 por ciento.

5.1 Introducción

Existe un creciente interés en el mundo por detener y tratar de revertir no solo la conversión (cambio en extensión), sino la degradación de los ecosistemas (cambio en condición). Por lo tanto, la medición de la condición de los ecosistemas resulta fundamental para diseñar las políticas ambientales y orientar a que la toma de decisiones se enfoque a proteger, mantener y restaurar el capital natural cada vez con mayor claridad. Además, los cambios en la condición influyen de manera evidente en la capacidad de los ecosistemas para generar los servicios que la sociedad valora. Por ello, generar cuentas integrales y comparables de la condición de los ecosistemas resulta de gran importancia (UN, 2020a).

9 $(19 - \sum \text{Índice de Capital Natural} \cdot 100)$, donde 19 corresponde al total de ecosistemas (no se incluyen cuerpos de agua).

Las cuentas de la condición de los ecosistemas proporcionan un enfoque estructurado para registrar y agregar datos que describen las características de los activos de los ecosistemas y sus cambios.¹⁰ De acuerdo con la definición del SEEA EA, la condición ecosistémica es la calidad del ecosistema medida en términos de sus características bióticas y abióticas. Esta se evalúa con respecto a su estructura, función y composición, lo cual sustenta la integridad ecológica del mismo y respalda su capacidad para suministrar servicios ecosistémicos (UN, 2021).

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar los resultados alcanzados para contabilizar la condición de los ecosistemas de México a través del IIE para 2004 y 2018¹¹ como un primer ejercicio para documentar dos puntos en el tiempo y los cambios ocurridos en este periodo.

5.2 Antecedentes

En 2019, dentro del proyecto NCAVES se analizaron variables (carbono orgánico en suelo, biodiversidad, estado de conservación de la vegetación); indicadores (erosión hídrica) e índices (Integridad Ecosistémica, Huella Humana e Integridad Ecológica), así como aproximaciones independientes con las cuales potencialmente se podría medir la condición de los ecosistemas (cuadro 5-1).

Recuadro 5-1. Principales variables e índices evaluados durante el proyecto NCAVES

Estado de conservación de la vegetación. Se basa en las series de vegetación y uso del suelo del INEGI para seis momentos diferentes (hacia 1976, 1993, 2002, 2007, 2011 y 2014). Como medida de condición, se distingue la etapa sucesional o estado de conservación de la vegetación: primaria (o relativamente bien conservada) y secundaria (o degradada).

10 En el capítulo 5 del documento del marco contable SEEA EA se establece el propósito de la contabilidad de la condición de los ecosistemas, indica sus componentes clave, la estructura, las etapas para llevarla a cabo y emite una serie de consideraciones para estimarla.

11 Este índice se puede calcular para otras fechas dependiendo de la disponibilidad de los datos provenientes del INFYS.

Índice de Integridad Ecosistémica. Elaborado dentro del proyecto Integridad Gamma, evalúa la condición de los ecosistemas con base en información obtenida del INFYS e imágenes satelitales en una escala de 0 a 100. Por el momento se tienen evaluaciones para 2004 y 2018, pero se puede calcular para otras fechas. El método de evaluación integra un modelo conceptual (denominado de tres capas) con técnicas de aprendizaje de máquina.

Índice de Huella Humana (IHH). Indicador de presión que denota, en términos relativos, la medida en que los entornos naturales han sido modificados o transformados por las actividades humanas. Se calcula estimando/evaluando tanto la extensión como la intensidad de la transformación causada por diversas actividades humanas. Por el momento se tienen evaluaciones para 2011 y 2014, pero se puede calcular para otras fechas.

Índice de Integridad Ecológica. Caracteriza "... el potencial de los paisajes naturales para apoyar la integridad ecológica en el mantenimiento de las interacciones de los depredadores ápice bióticos y abióticos..." (CONABIO, 2009). Se basa en una red ecológica jerárquica para describir los cambios que ocurren en varios niveles. El enfoque incluye: "... (a) la construcción de indicadores espacialmente explícitos para la integridad ecológica como base del sistema de evaluación; (b) la aplicación de modelos de ecuaciones estructurales para derivar un conjunto de indicadores latentes que construyan la noción de integridad ecológica en dos niveles; y (c) un indicador general que resume la integridad en la condición ecológica..."

Cada una de estas aproximaciones presenta ventajas y desventajas, y aporta elementos valiosos para la contabilidad de la condición de los ecosistemas. En particular, el **Índice de Integridad Ecosistémica** tiene como parte de sus propósitos aprovechar la gran cantidad de datos ambientales utilizadas para el monitoreo ambiental del país (por ejemplo, del Inventario Nacional Forestal y de Suelos, INFYS, y del Sistema Nacional de Monitoreo de la Biodiversidad, SNMB), así como información sobre vegetación y uso del suelo (por ejemplo, INEGI) e imágenes satelitales. En este ejercicio piloto, y gracias a la experiencia obtenida dentro del proyecto NCAVES y a la discusión y la colaboración con diversas instituciones (INEGI, SEMARNAT, INECOL, CONABIO, CONAFOR, CONANP e IG, UNAM), se decidió realizar la contabilidad de la condición de los ecosistemas utilizando como base el IIE, el cual cumple con los criterios, objetivos y consideraciones establecidos por el SEEA EA y permite integrar la información generada a través de las aproximaciones previas para medir la condición de los ecosistemas (recuadro 5-1).

Cuadro 5-1. Variables, indicadores e índices considerados en la evaluación de la integridad de los ecosistemas terrestres de México

	Clases tipológicas propuestas en el marco SEEA-EA						
	Características bióticas				Características abióticas		Características de paisaje
	Indicadores de composición		Vegetación y biomasa		Estado físico y químico		Patrón del paisaje
Criterio del SEEA EA	Biodiversidad	Índice de Integridad Ecológica	Estado de conservación de la vegetación	Índice de Integridad Ecosistémica	Carbono orgánico en el suelo	Erosión hídrica	Huella humana
Relevancia	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Estado de orientación	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Conformidad del marco	Sí	Sí	Parcial	Sí	Sí	Sí	Parcial
Consistencia espacial	Sí	Sí	Sí	Sí	Parcial	Sí	Sí
Consistencia temporal	No	No	Sí	Sí	No	No	Sí
Factibilidad	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Cuantitativo	Sí (proporcional)	Sí (ordinal)	Sí (proporcional)	Sí (ordinal)	Sí (proporcional)	Sí (ordinal)	Sí (ordinal)
Fiabilidad	Alto	Bajo	Alto	Moderado	Alto	Moderado	Alto
Normatividad	No	Sí	Parcial	Sí	No	Sí	Sí
Simplicidad	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	No

Fuente: INECOL, modificado de Sánchez-Colón (2019).

Uno de los objetivos del SEEA EA es contar con una **medida agregada de la condición del ecosistema**, para la cual en el manual se proponen distintos métodos de análisis y cálculo. El Índice de Integridad Ecosistémica ofrece una alternativa novedosa para obtener esta medida, proponiendo obtenerla a partir del uso de redes bayesianas. En contraste con los índices *ad hoc* que suelen usarse en estos casos, los algoritmos asociados a estas redes son una herramienta útil para analizar la complejidad, heterogeneidad y diversidad de las relaciones entre variables de los sistemas ecológicos.

Cabe aclarar que el método usado para calcular el IIE combina la etapa 2, donde se establecen los indicadores de la condición del ecosistema con la etapa 3, cuyo objetivo es obtener la

medida agregada de la condición del ecosistema. Además de este cambio respecto a la guía, a lo largo de este capítulo se establecen los vínculos entre los lineamientos del SEEA EA con los aspectos conceptuales y metodológicos asociados al Índice de Integridad Ecosistémica.

En la sección 5.4.4 se presenta una primera propuesta para consolidar el proceso de contabilidad de condición de ecosistemas a través de la integración de variables adicionales, como el estado de conservación de la vegetación y el Índice de Huella Humana.

5.3 Método

5.3.1 Etapas para la evaluación de la condición de ecosistemas

La cuenta de la condición se compiló por tipo de ecosistema con base en la clasificación CONAFOR-IPCC-N3 utilizada en el análisis de extensión (*Capítulo 4*). Para la evaluación de la condición, el SEEA EA propone un desarrollo consecutivo de tres etapas. En la primera de ellas se establece el enfoque de medición, donde se definen y seleccionan las **características del ecosistema**, que son aquellos rasgos de este que son relevantes para la evaluación de su condición, y las **variables asociadas**, las cuales son métricas cuantitativas que describen características individuales de un activo del ecosistema. Una sola característica puede tener diferentes variables asociadas, que pueden ser complementarias o superpuestas. Estas se diferencian de las características (incluso si se les aplica el mismo descriptor) porque tienen una definición clara e inequívoca (instrucciones de medición, fórmulas, etc.) y unidades de medida bien definidas que indican la cantidad o calidad que miden. Esta primera etapa es importante para sustentar la compilación de indicadores de la segunda etapa y para derivar **medidas agregadas de condición** en la tercera (UN, 2021).

5.3.1.1 Etapa 1. Selección de las variables de la condición de los ecosistemas

Para cada uno de los tipos de ecosistemas, se seleccionaron variables que evalúan las características biofísicas de estos, además de otras variables auxiliares¹² (cuadro 5-2). Se eligieron 10 **variables de estado** (siete de tipo estructural y tres de funcional) y tres **de presión**, de acuerdo con la tipología especificada en el SEEA EA (cuadro 5-2). Estas reflejan cambios a lo largo del tiempo en las características clave de cada activo del ecosistema (UN, 2021, SEEA EA párrafo 5.15). Cabe señalar que algunas de las clases sugeridas por el SEEA EA no han sido consideradas por el momento o están en proceso de inclusión en el modelo (ver cuadro 5-2). Tanto las características como las variables y sus métricas fueron evaluadas en función de los criterios conceptuales, de vialidad, optimización y de conjunto sugeridos por el SEEA EA (*Anexo 9.5, Criterios de elección de variables*). Las variables corresponden a las que conforman el Índice de Integridad Ecosistémica en el modelo que se ha denominado de tres capas (explicado con mayor detalle en el apartado 5.3.1.3 de este informe, donde se describe la etapa 3).

12 Sobre estas variables no se hace contabilidad, pero se indican dada su importancia para calcular el Índice de Integridad Ecosistémica.

Cuadro 5-2. Tipología de la condición de los ecosistemas propuesta por el SEEA EA y relación con variables del modelo de tres capas*

Continúa

Grupos	Clases según SEEA EA	Variables del modelo de tres capas
Características abióticas del ecosistema	1. Características del estado físico (incluida la estructura del suelo, la disponibilidad de agua).	No consideradas aún.
	2. Características del estado químico (incluidos los niveles de nutrientes del suelo, la calidad del agua, las concentraciones de contaminantes del aire).	No consideradas aún.

Cuadro 5-2. Tipología de la condición de los ecosistemas propuesta por el SEEA EA y relación con variables del modelo de tres capas*

Continúa

Grupos	Clases según SEEA EA	Variables del modelo de tres capas
Características bióticas del ecosistema	3. Características de composición (incluidos los indicadores basados en especies).	No consideradas aún.
	4. Características del estado estructural (incluida la vegetación, la biomasa, cadenas tróficas).	Capa de detección de signos: - Número de árboles y arbustos por hectárea (ha). - Altura del arbolado (promedio y desviación estándar). - Diámetro a la altura del pecho (DAP; promedio y desviación estándar). - Diámetro de copa (promedio y desviación estándar). - Altura de fuste (promedio y desviación estándar). - Probabilidad de presencia de árboles muertos en pie. - Porcentaje de píxeles cubierto con crecimiento arbóreo, arbóreo tropical, arbustivo y herbáceo.
	5. Características del estado funcional (incluidos los procesos ecosistémicos, los regímenes de perturbación).	Capa de detección de signos: - Probabilidad de presencia de plagas en árboles. - Fotosíntesis neta anual, temporadas de secas y lluvias (promedio anual y desviación estándar). - Próximamente grupos funcionales faunísticos (obtención de datos a través de cámaras trampa y grabadoras).
Características a nivel paisaje	6. Características del paisaje terrestre y del paisaje marino (incluida la diversidad paisajística, la conectividad, la fragmentación, los elementos seminaturales incrustados en las tierras de cultivo).	Próximamente fragmentación y conectividad en paisaje terrestre.

Cuadro 5-2. Tipología de la condición de los ecosistemas propuesta por el SEEA EA y relación con variables del modelo de tres capas*

Concluye

Grupos	Clases según SEEA EA	Variables del modelo de tres capas
Características auxiliares	Características pertinentes del ecosistema que por cualquier motivo no encajan en el ámbito de aplicación de las cuentas de condición de SEEA EA. Los datos auxiliares también incluyen variables relativas a características ambientales estables que es poco probable que cambien debido a las actividades humanas, como la elevación o la pendiente, pero que siguen siendo relevantes en la medición de la condición.	Capa contextual: - Elevación. - Biotemperatura, precipitación, evapotranspiración (zonas de vida de Holdridge). Intervención humana:** - Porcentaje de píxeles cubiertos por: suelo desnudo,*** pastizales artificiales o agricultura y asentamientos humanos. - Huella humana (diversas variables).****

* Una descripción técnica de cómo fueron obtenidas y medidas cada una estas variables pueden consultarse en el Anexo 6.1, hoja Descripción de variables.

** El SEEA-EA considera esta variable dentro de su tipología como una variable indicadora que puede utilizarse ante la ausencia de otros indicadores de estado y hace una serie de observaciones sobre su uso (apartado 5.4.3, SEEA, 2020b). En el caso de México, estas características no son consideradas como indicadores, sino como acciones que modifican la condición de los ecosistemas.

*** Se reconoce que el suelo desnudo es resultado de un disturbio, como pueden ser el sobrepastoreo, la deforestación, el cambio de uso del suelo a actividades agropecuarias, entre otras.

**** Si bien las variables del Índice de Huella Humana no forman parte del Índice de Integridad Ecosistémica se incluyen en este cuadro debido a la relación que se hace entre ambos índices en el apartado 5.4.4 de este informe. Estas variables son: traza urbana; localidades 500 a 2 500 habitantes; localidades < 500 habitantes; agricultura de temporal, humedad o riego; acuicultura; bosques inducidos y cultivados; pastizal inducido y cultivado; carretera pavimentada; carretera terracería; carretera revestida con una capa delgada de asfalto; carretera revestida de tierra o grava; líneas de transmisión eléctrica; vías férreas; industria; plantas de tratamiento de agua; salinas artificiales; rasgos arqueológicos; deposición final de residuos sólidos a cielo abierto; deposición final de residuos sólidos en relleno sanitario; minas, zona primaria; minas, zona secundaria; minas, zona terciaria,

5.3.1.2 Etapa 2. Indicadores de la condición del ecosistema

En la segunda etapa, el SEEA EA sugiere derivar indicadores de la condición del ecosistema a partir del reescalamiento de las variables contabilizadas en la etapa 1 que conduce a la **cuenta de indicadores de condición del ecosistema**. El reescalamiento se realiza como una función de niveles de referencia (máximos y mínimos) determinados con respecto a la integridad del ecosistema.

La metodología que se ha desarrollado en torno al IIE y al uso de redes bayesianas¹³ tiene el potencial y la ventaja de inferir qué se podrían esperar bajo distintos niveles de integridad. Estas son dispositivos matemáticos capaces de procesar datos con distintos *enfoques de razonamiento* (Pourret, 2008). Uno de estos es el deductivo, que procesaría datos alimentados a nodos de efecto (integridad ecosistémica) y la red calcularía los valores que podrían esperarse en los nodos de causa (variables). Gracias a esta capacidad de la red, es posible inferir los niveles de referencia para cada tipo de ecosistemas y para cada una de las variables incluidas en la red. Por ejemplo, el valor del nivel de referencia del número de árboles en una zona boscosa será diferente al de una árida, etcétera. Es posible que la identificación de estos umbrales mínimos y máximos de los distintos niveles de integridad sea más factible detectarlos para algunas variables y en algunos tipos de vegetación, pero esto requiere más análisis.

En un tercer paso, de acuerdo con el SEEA EA, estos indicadores se agregarían para obtener índices sobre la condición general del ecosistema. En contraste, el enfoque del IIE que se utilizó en México combina las etapas 2 y 3 en un solo paso con la fortaleza de poder compilar una medida de condición agregada espacialmente explícita que es ecológicamente significativa. Por tal razón, no se presentan resultados para la etapa 2.

13 Ver Etapa 3. Medida agregada de la condición del ecosistema.

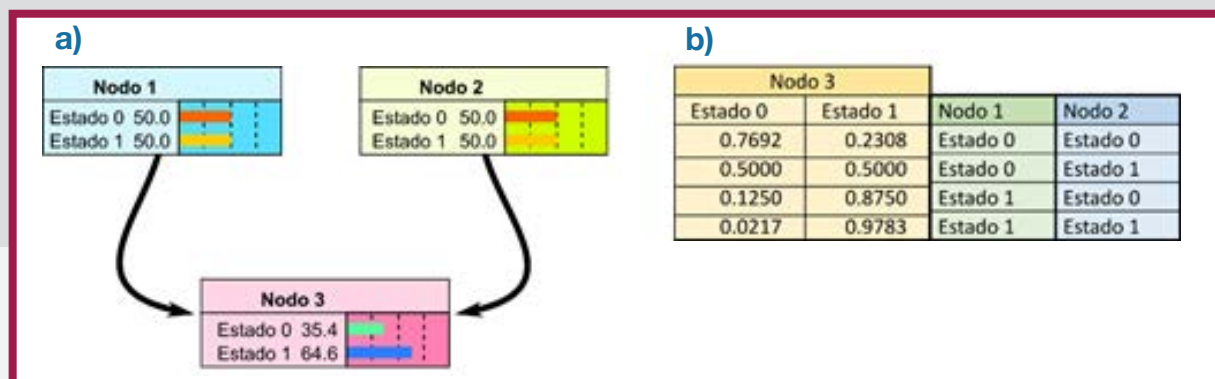
5.3.1.3 Etapa 3. Medida agregada de la condición del ecosistema

De acuerdo con el SEEA EA, la agregación de indicadores de la condición de los ecosistemas tiene como objetivo generar información resumida a partir de una gran cantidad de puntos de observación como fuentes de datos; sugiere un enfoque jerárquico de agregación que refleje la estructura de la tipología de la clasificación de indicadores, con subíndices de los indicadores primero y luego un índice agregado de los subíndices (UN, 2021, SEEA EA, párrafo 5.77). Para la contabilidad de la condición de los ecosistemas terrestres en México, el **Índice de Integridad Ecosistémica** representa una medida de agregación de las distintas variables de la etapa 1 a través de una aproximación principalmente impulsada por datos (*data driven*). Aunque las variables están clasificadas como estructurales y funcionales (cuadro 5-2), para la conformación del Índice no se sigue una agregación de subíndices con base en estas clases. Dado el alto número de interacciones que se pueden presentar con las variables elegidas, resulta complicado agregarlas aun incorporando expertos en esta tarea, como sugiere el SEEA EA. Por ejemplo, a partir del número de variables que se eligieron en la sección anterior (considerando valores promedios y desviación estándar en algunas de ellas) tendría que establecerse el conjunto de combinaciones de relaciones entre **intervenciones** (cuatro variables) y la **capa de detección de signos** (19 variables) de cada **zona de vida** (28 zonas). Una segunda opción sería utilizar métodos multivariados que permitan definir variables compuestas para reducir la dimensionalidad del complejo de variables o aproximaciones impulsadas por datos (por ejemplo, redes neuronales) que busquen patrones de correlación entre estas. Sin embargo, en ambos casos se sacrifica la interpretabilidad del modelo.

En este trabajo se decidió usar una opción basada en redes bayesianas. Este tipo de modelos estadísticos son contruidos a partir de un grafo acíclico dirigido, con variables como nodos vinculados por flechas que apuntan en la dirección de la influencia (idealmente una relación de causalidad conocida, o bien, una hipótesis sobre dicha relación), conformando la estructura de la red (figura 5-1). Esta estructura puede realizarse con base en opinión de expertos. La estructura también puede descubrirse con una aproximación impulsada por datos o una combinación de ambas con la meta de representar las principales relaciones entre los elementos del modelo. La estructura de la red bayesiana que se utilizó para el IIE se construyó mediante una estrategia combinada donde se identifican: a) los distintos tipos de ecosistemas que se pueden establecer, b) la intervención humana (presión) que modifica estos ecosistemas y c) la estrategia impulsada por datos donde un algoritmo sugiere la interrelación que existe en las medidas estructurales y funcionales. Esto se explica con mayor detalle en la siguiente sección.¹⁴ El otro componente de la red es una matriz de distribución condicional $p(x_{ij} | pa(x_i))$ para cada variable x_i , dados los nodos padre en el grafo, denotada como $pa(x_i)$ (figura 5-1).

14 Una descripción técnica del método utilizado puede consultarse en el *White paper* (Anexo 6.2) y en García Alaniz *et al.*, 2015) (Equihua *et al.*, 2020) disponible en https://seea.un.org/sites/seea.un.org/files/ei_whitepaper_on_data-driven_condition_computation_-_mexico.pdf

Figura 5-1. Red bayesiana



Modelo estadístico multivariado para un conjunto de variables aleatorias que se especifica con base en dos componentes: a) cualitativo: grafo acíclico dirigido (GAD), donde un nodo es una variable y el arco o flecha indica la existencia de dependencia entre las variables (por el tipo de relación que presentan suele denominarse a los nodos 1 y 2, nodos padre y al 3, nodo hijo); y b) cuantitativo, constituido por una matriz de probabilidad condicional.

5.3.1.3.1 Índice de Integridad Ecosistémica

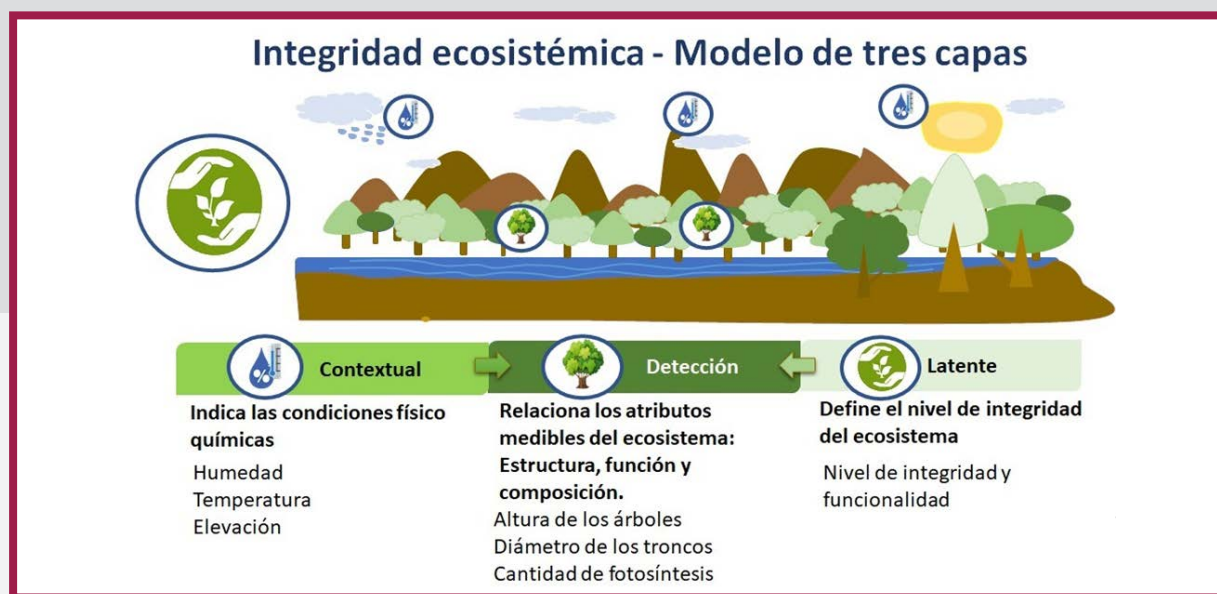
El **IIE** se basa en el concepto de **integridad ecosistémica**, definida como un estado del ecosistema que surge de su capacidad para autoorganizarse en concordancia con los factores fisicoquímicos y los procesos biológicos locales. La integridad ecosistémica alcanza pleno desarrollo (y un valor máximo) cuando no hay alteración de origen humano. Se reconoce que la oferta de bienes y servicios ecosistémicos depende tanto del tipo de ecosistema como de su estado de integridad.¹⁵ El interés por maximizar uno o varios servicios ecosistémicos y los mismos procesos ecológicos del ecosistema ocasionan que la condición de un ecosistema

¹⁵ Esta definición se apega a la expresada en el SEEA EA, la cual establece que "... la condición ecosistémica es la calidad de un ecosistema medida en términos de sus características abióticas y bióticas. La calidad se evalúa con respecto a la estructura, función y composición del ecosistema que, a su vez, sustenta la integridad ecológica del mismo y respalda su capacidad para suministrar servicios ecosistémicos..." (SEEA, 2020).

sea inherentemente dinámica. Además, se debe señalar que su gestión depende de acuerdos sociales que buscan producir estados deseables que canalicen los flujos de materiales y energía hacia los intereses humanos.

El IIE¹⁶ establece, a través de un modelo de tres capas, la relación entre las características abióticas, bióticas y la condición del ecosistema (figura 5-2). Con base en este modelo y en un referente de óptima integridad que asume ausencia de intervenciones humanas, se estima la condición en cada celda de 250 x 250 m a lo largo de la superficie del país. El modelo aquí presentado fue entrenado con datos de 2018 y, una vez parametrizado, se calculó la integridad ecosistémica para 2004 y 2018 utilizando el conjunto de variables para cada año. Cabe aclarar que la estimación puede realizarse para cualquier año en el que se cuente con información de las variables usadas en el modelo.

Figura 5-2. Modelo de tres capas

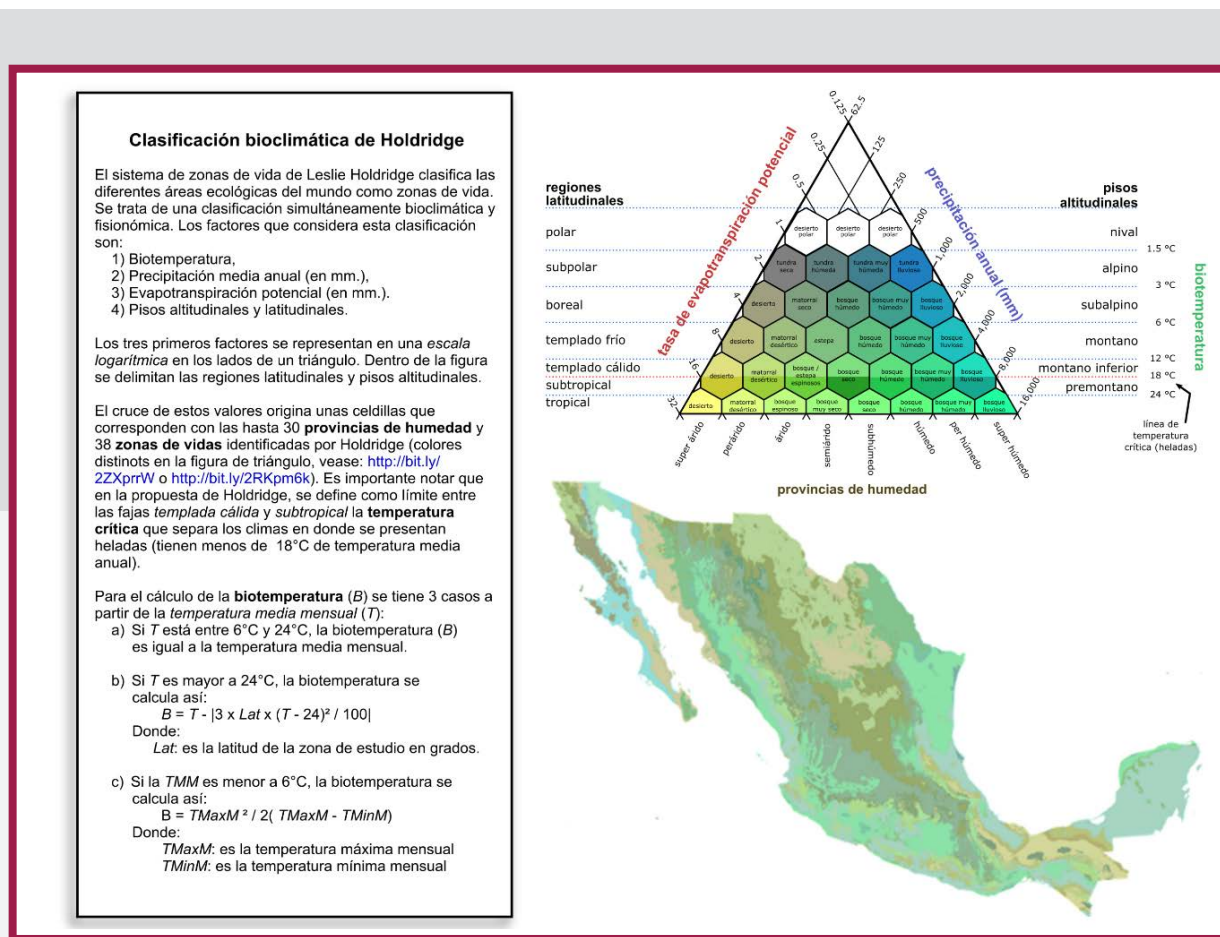


Nota: las características observables de un ecosistema (capa de detección de signos) emergen de procesos naturales (capa contextual) y antropogénicos que operan concurrentemente sobre él (presiones); la capa superior del modelo (capa latente) representa la condición del ecosistema, la cual se infiere a partir de las otras dos capas.

Fuente: elaboración propia.

16 El Índice de Integridad Ecosistémica es parte de los resultados obtenidos dentro del proyecto Integralidad Gamma (CONACYT).

Figura 5-3. Zonas de vida de Holdridge



5.3.1.3.1.1 Capa contextual

Esta representa el intervalo de variabilidad natural de las condiciones fisicoquímicas en el cual es posible la existencia de un determinado tipo de ecosistema. Para incluir este componente en el análisis, hemos elegido la caracterización de zonas de vida propuesta por Holdridge (Holdridge, 1967)¹⁷ que utiliza como variables la precipitación, la biotemperatura (medición

¹⁷ Podría haberse elegido otro tipo de clasificación, pero usar las zonas de vida de Holdridge resulta atractivo dada la posibilidad de utilizarse para evaluar la condición en cualquier país o región terrestre, excepto costas.

de solo aquel calor que es efectivo para el crecimiento de las plantas) y su relación con la evapotranspiración.¹⁸ Con base en estas variables y criterios se caracterizó al país en 28 zonas de vida (figura 5-3). Además, se incluyó la elevación y rugosidad del terreno como otra variable de esta capa contextual.

De acuerdo con lo anterior, se asume que ante la ausencia de **intervención humana** las características de un ecosistema, y por lo tanto los valores de las **variables de la capa de detección de signos**, solo serán afectadas por las condiciones fisicoquímicas (precipitación, biotemperatura y evapotranspiración) de cada zona y tenderían a mostrar valores congruentes con una condición de máxima integridad. La disimilitud de los valores de las variables de la **capa de detección de signos** respecto a lo que se considera su condición óptima nos permitirá tener una medida de la condición de cada celda de cada ecosistema.

5.3.1.3.1.2 Capa de detección de signos

Las variables de esta capa se han subdividido en características funcionales, estructurales y de composición de especies. Estos tres elementos dan información relevante sobre la condición de un ecosistema (UN, 2020b). El análisis se realizó utilizando solamente variables sobre características estructurales y funcionales, no incluye un monitoreo de la composición de especies debido al costo económico y los trabajos de campo y gabinete que implicarían la evaluación continua de especies a nivel nacional. No obstante, se está explorando la posibilidad de monitorear con métodos acústicos y de fototrampeo a grupos de especies que jueguen un papel clave en los procesos funcionales dentro del ecosistema, como parte del Sistema Nacional de Monitoreo de Biodiversidad (SNMB) de la CONABIO.

En términos de la funcionalidad de los ecosistemas, actualmente se monitorea la presencia de plagas en árboles, como una variable que identifica este grupo de organismos que puede alterar la funcionalidad del ecosistema y en el futuro se añadirán otros gremios (grupos funcionales) para monitorear funciones de dispersión, polinización y depredación. Para ello, ya se obtienen datos sobre la presencia de estos grupos a través de grabadoras autónomas de sonido y cámaras trampa, gracias a la colaboración con instituciones nacionales como la CONAFOR y CONANP. Por otro lado, para la evaluación de la condición, se trabaja en la inclusión de otras variables que permitan estimar la fragmentación y la conectividad a nivel de paisaje. La com-

¹⁸ Las variables de la capa contextual corresponden a las variables auxiliares según las sugerencias del SEEA-EA (ver cuadro 6.1).

binación de estas variables con el análisis a nivel de celdas enriquecerá la evaluación que se haga de la condición de fragmentos de vegetación a distintas escalas.

5.3.1.3.2 Capa latente

En la figura 5-2, la capa superior del modelo de tres capas representa la condición del ecosistema, la cual es una variable latente u oculta que, a diferencia de las otras variables, no se observa directamente con facilidad o resulta imposible hacerlo, pero puede inferirse a partir de las otras capas (de detección de signos y contextual) utilizando un modelo probabilístico y algoritmos de cómputo apropiados. Para inferir las tablas de probabilidades condicionales tanto de esta variable latente como del resto de los nodos, se utilizó el algoritmo Esperanza-Maximización (EM) implementado en Netica®.¹⁹

Las redes bayesianas tienen como característica hacer uso de toda la información disponible para generar las estimaciones, lo que optimiza la confiabilidad de las predicciones. En este sentido, se decidió enriquecer el modelo de tres capas con dos fuentes más de información: presiones ambientales (como una capa adicional) e Índice de Hemerobia (como datos para entrenar el modelo).

5.3.1.3.2.1 Presiones ambientales

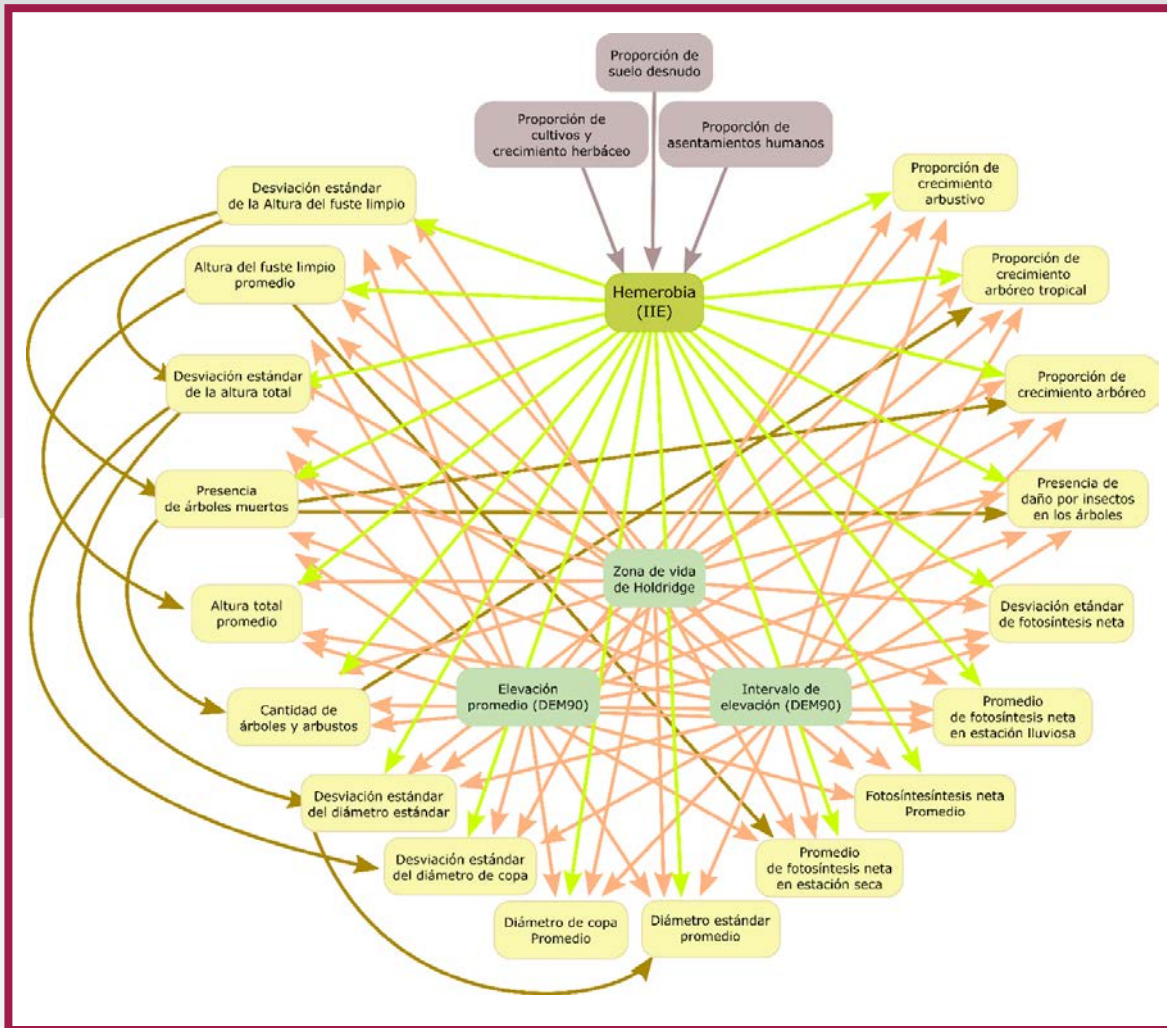
Para la evaluación de la condición, se incluye también el efecto que tiene la **intervención humana** o presiones entendidas de acuerdo con el **SEEA EA**.²⁰ Dentro de las variables de presión se consideró el porcentaje de cada pixel cubierto por suelo desnudo, por cultivos y crecimiento herbáceo y asentamientos humanos (figura 5-4).

Se observa la estructura de la red construida para estimar la condición de los ecosistemas terrestres de México. Además de las capas correspondientes al Índice de Integridad Ecosistémica (de detección de signos y contextual), se añaden dos elementos: una capa de impulsores (presión) en color gris y se indica en el nodo IIE en verde qué información previa sobre el estado de los ecosistemas fue incorporada a la red a través del Índice de Hemerobia.

19 Software comercial para el desarrollo de redes bayesianas.

20 Preferimos la idea de la intervención humana en lugar del concepto de presión sugerida por SEEA, ya que este último suele tener una connotación negativa. Por el contrario, la idea de la intervención humana incluye tanto los efectos negativos como los positivos de las políticas y prácticas que afectan la condición ecosistémica.

Figura 5-4. Red bayesiana del modelo de tres capas y variables de intervención humana (impulsores)



Fuente: elaboración propia.

5.3.1.3.2.2 Índice de Hemerobia

Este puede entenderse como una medida integradora del impacto de toda la intervención humana en los ecosistemas (Walz and Stein, 2014).

El Índice estima el grado de transformación que se asume mostró la *vegetación primaria* (INEGI, 2003) con respecto a la cobertura terrestre actual obtenida de las imágenes satelitales clasificadas de 2014, uso de suelo y vegetación, INEGI serie VI (2016).

Este índice fue calculado con el fin de contar con datos de referencia o línea base para entrenar la red, pues es de interés realizar una evaluación que aproxime el juicio humano al valorar el grado de alteración que se puede apreciar en los ecosistemas (Maeda, 2013; Roche and Campagne, 2017).

Cuadro 5-3. Índice de Hemerobia-Transformación de cambio entre la vegetación primaria y uso de suelo y vegetación en 2014

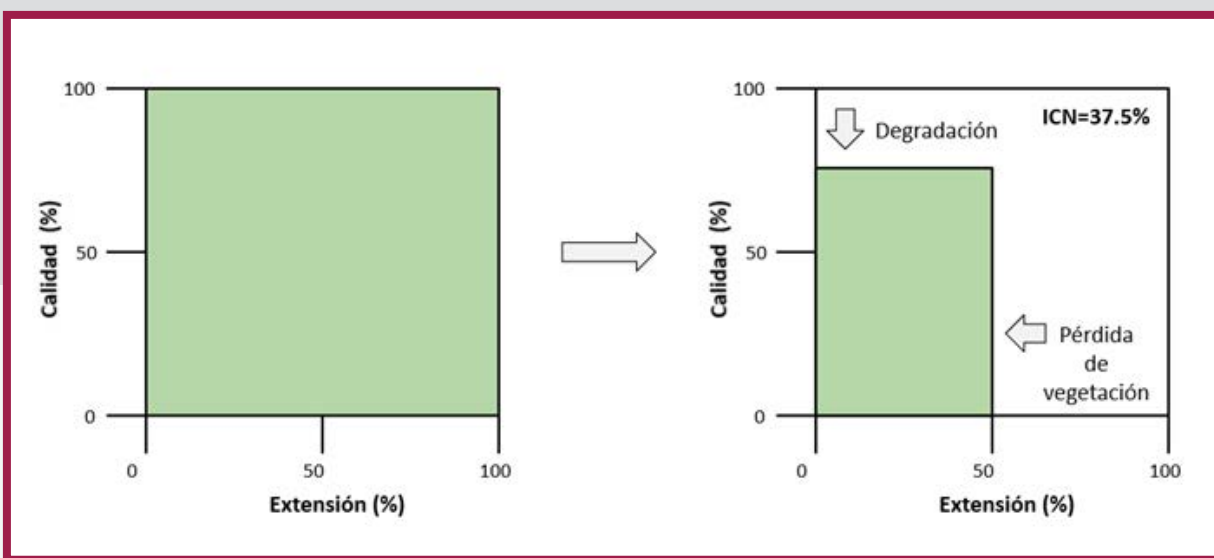
Hemerobia (ΔVP)	Estado	Descripción
0	ESTASIS	NO HAY CAMBIO DE TIPO DE VEGETACIÓN NI DE ESTADO PRIMARIO
1	PSEUDOESTASIS inferior	NO HAY CAMBIO DE ESTADO PRIMARIO, SI HAY CAMBIO DE TIPO DE VEGETACIÓN PERO DENTRO DE LA MISMA ECOVARIANTE
2	PSEUDOESTASIS media	NO HAY CAMBIO DE ESTADO PRIMARIO, SI HAY CAMBIO DE TIPO DE VEGETACIÓN A OTRA ECOVARIANTE PERO EL ESTRATO DOMINANTE ASCIENDIENDO EN PORTE (E.G. de Matorral a Bosque)
3	PSEUDOESTASIS superior	NO HAY CAMBIO DE ESTADO PRIMARIO, SI HAY CAMBIO DE TIPO DE VEGETACIÓN A OTRA ECOVARIANTE PERO MANTENIENDOSE EL PORTE DEL ESTRATO DOMINANTE (e.g. de Bosque de Encino a Selva baja)
4	DEGRADACIÓN MUY SOMERA	NO HAY CAMBIO DE ESTADO PRIMARIO, SI HAY CAMBIO DE TIPO DE VEGETACIÓN A OTRA ECOVARIANTE PERO EL ESTRATO DOMINANTE DESCENDIENDO EN PORTE (e.g. de Matorral a Pastizal o Herbazal)
5	DEGRADACIÓN SOMERA inferior	CAMBIO DE BOSQUES O SELVAS PRIMARIAS A VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA
6	DEGRADACIÓN SOMERA superior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A BOSQUE INDUCIDO O PLANTACIÓN FORESTAL
7	DEGRADACIÓN MODERADA inferior	CAMBIO DE BOSQUES, SELVAS O MATORRALES PRIMARIOS A VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA
8	DEGRADACIÓN MODERADA media inferior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A VEGETACIÓN SABANOIDE
9	DEGRADACIÓN MODERADA media superior	CAMBIO DE BOSQUES, SELVAS, MATORRALES, HERBAZALES O PASTIZALES PRIMARIOS A VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBACEA
10	DEGRADACIÓN MODERADA superior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A PALMAR INDUCIDO O PASTIZAL INDUCIDO O PASTIZAL CULTIVADO
11	DEGRADACIÓN SEVERA inferior	CAMBIO DE CUERPO DE AGUA A USO ACUICOLA
12	DEGRADACIÓN SEVERA media inferior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A AGRICULTURA DE TEMPORAL
13	DEGRADACIÓN SEVERA media superior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A AGRICULTURA DE RIEGO
14	DEGRADACIÓN SEVERA superior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A AGRICULTURA DE HUMEDAD
15	DEGRADACIÓN MUY SEVERA inferior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A CUERPO DE AGUA
16	DEGRADACIÓN MUY SEVERA media inferior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE O DESPROVISTA DE VEGETACIÓN
17	DEGRADACIÓN MUY SEVERA media superior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A ASENTAMIENTOS HUMANOS
18	DEGRADACIÓN MUY SEVERA superior	CAMBIO DE CUALQUIER TIPO DE VEGETACIÓN PRIMARIA A ZONA URBANA
-9999		NO DATO

Nota: la columna Hemerobia (ΔVP) indica el valor que se le asignó a cada celda en función del cambio que se presentó entre la vegetación primaria y la serie VI del INEGI, denominados como estados.

5.3.2 Extensión efectiva e Índice de Capital Natural

A partir de los resultados obtenidos con el Índice de Integridad Ecosistémica y los datos de extensión (*Capítulo 4*) se calculó la extensión efectiva y el Índice de Capital Natural (INC, Czúcz *et al.*, 2012). La extensión efectiva es el área de cada tipo de vegetación ponderada por su condición. El INC se define como la extensión efectiva relativa a un área de interés en términos porcentuales. Por lo tanto, siempre es un número entre 0 y 100 % (figura 5-5).

Figura 5-5. Ejemplo del cálculo de capital natural



La gráfica de la izquierda ejemplifica el caso en el que un ecosistema presenta toda su extensión y total integridad ($IIE = 1$). La del lado derecho muestra el resultado cuando un ecosistema disminuyó en 50 % y perdió 25 % de su calidad ($IIE = 0.75$), por lo tanto, $INC = 0.5 \times 0.75 = 0.375$ (modificado de Czúcz *et al.*, 2012).

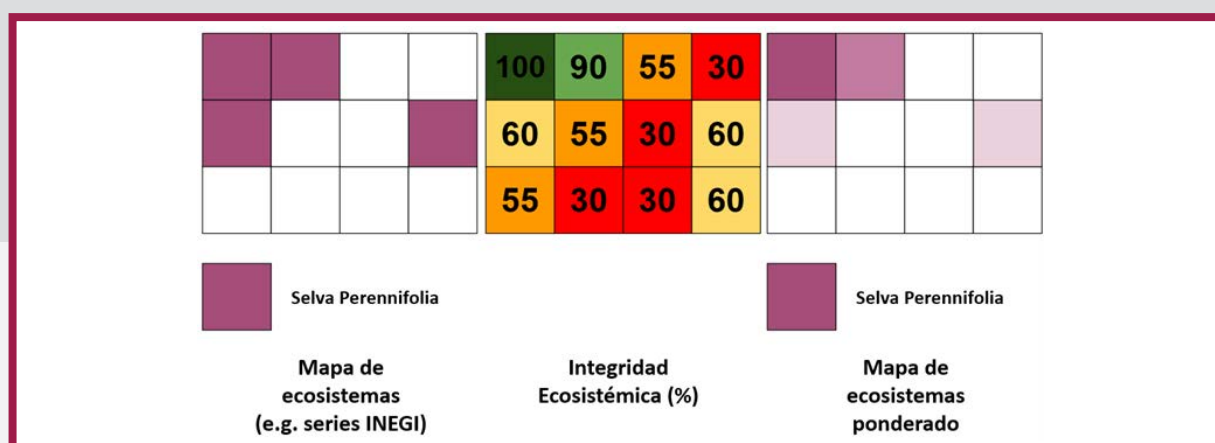
Para poder calcular el ICN de un área de interés (estado, municipio, cuenca, región, etc.) con base en productos espaciales, se propone utilizar la siguiente expresión matemática (Czúcz *et al.*, 2012):

$$NCI_r = \frac{1}{A_r} \sum_{i \in S_r} q_i A_i$$

donde: A_r es el área total de la región de interés, r , examinada (en unidades arbitrarias, por ejemplo, km²); S_r es el conjunto de todos los parches considerados naturales en la región A_r ; A_i es el área de cada parche de hábitat y q_i , su correspondiente calidad. En este caso, el conjunto de todos los parches de hábitat individuales (S_r) está conformado por cada una de las celdas de 250 m que cubren al territorio nacional, ya que esta es la resolución con la que se integraron las coberturas cartográficas de vegetación (INEGI) y del Índice de Integridad Ecosistémica. Dado el formato *raster* de los productos espaciales, el valor de $A_i = 1/16 = 0.0625$ de km² para cada pixel.

Esta ecuación se aplicó para cada ecosistema por separado que en este estudio piloto constituyó la región de interés. Cada pixel que conforma un ecosistema dado se multiplicó por su correspondiente calidad estimada a partir del IIE; la sumatoria de tales productos da lugar a la extensión **efectiva**. El ICN se obtiene al dividir esta entre la extensión sin ponderar, esto es, la extensión si todo el ecosistema estuviera en su estado ideal (calidad 100 %). Se muestra un ejemplo ilustrativo de este cálculo en la figura 5-6.

Figura 5-6. Ejemplo de cálculo de capital natural para selva perennifolia



La extensión es $4 \times 0.0625 = 0.25$ km²; la extensión efectiva es $0.0625(1) + 0.0625(0.9) + 0.0625(0.6) + 0.0625(0.6) = 0.19$ km²; finalmente, el capital natural es $0.19/0.25 = 0.76$. Esto significa que queda 76 % de la extensión ideal.

5.4 Resultados

5.4.1 Etapa 1. Contabilidad de las variables de la condición de los ecosistemas

En el cuadro 5-4 se resumen los cambios en las variables de la condición para cada tipo de ecosistema (vegetación) en México entre 2004 y 2018. La mayoría de las variables presentan cambios mínimos entre las dos fechas analizadas. No obstante, se observa que algunas variables estructurales, funcionales y de presión cambiaron de manera importante entre 2004 y 2018.

El resumen del cambio relativo (en porcentaje) entre 2004 y 2018 de las variables de la condición de los ecosistemas (cuadro 5-4), considerando variables estructurales, funcionales y de presión, muestra algunas tendencias relevantes. La mayoría de los ecosistemas forestales mostraron incrementos estructurales que se manifiestan en el *% de pixel cubierto con crecimiento arbóreo y arbóreo tropical*. Por otro lado, el *% de pixel cubierto con crecimiento arbustivo* mostró tendencias negativas en la mayoría de los casos. Funcionalmente, se observa una tendencia negativa en la mayoría de los ecosistemas, aunque con intensidades que fluctúan entre moderadas a bajas. Se observa también un incremento en las presiones ejercidas por asentamientos, un aumento en el porcentaje de suelo desnudo y una tendencia negativa en el *% de pixel cubierto por crecimiento herbáceo*.

El matorral xerófilo no leñoso mostró cambios estructurales importantes; en cambio, el matorral xerófilo leñoso tuvo cambios importantes de carácter funcional. Es notorio que la mayoría de los ecosistemas están expuestos a una presión en términos de *% pixel cubierto por asentamientos* y en menor medida, por suelo desnudo.

En la mitad de los ecosistemas hubo incrementos en el *% de pixel cubierto con crecimiento arbóreo tropical* y el *% de pixel cubierto con crecimiento arbóreo*, sobre todo en los ecosistemas antrópicos y en los leñosos (en el caso de crecimiento arbóreo tropical) y en los pastizales y selva caducifolia (en el de crecimiento arbóreo). Contrario a lo anterior, en la mayoría de los ecosistemas, el *% de pixel cubierto con crecimiento arbustivo* tuvo un decremento importante, excepto en la selva caducifolia, en la cual incrementó. También, es importante resaltar que el número de árboles y arbustos por hectárea, la altura promedio del arbolado y el diámetro

Cuadro 5-4. Resumen del cambio relativo entre 2004 y 2018 de las variables de la condición de los ecosistemas, considerando variables estructurales, funcionales y de presión

Estado	Estructural													Funcional					Presión		
	Número de árboles y arbustos por ha	Altura promedio del arbolado	Desviación estándar de las alturas del arbolado	Diámetro promedio a la altura del pecho (DAP)	Desviación estándar de los DAPs	Diámetro de copa promedio	Desviación estándar de los diámetros de copa	Altura de fuste promedio	Desviación estándar de las alturas de fuste	Probabilidad de presencia de árboles muertos en pie	% of Pixel cubierto con crecimiento arboreo tropical	% of Pixel cubierto por crecimiento arboreo	% of Pixel cubierto por crecimiento arbustivo	Probabilidad de presencia de plagas en árboles	Fotosíntesis neta promedio anual	Desviación estándar de la fotosíntesis neta anual	Fotosíntesis neta promedio en temporada de secas	Fotosíntesis neta promedio en temporada de lluvias	% of Pixel cubierto por crecimiento herbáceo	% of Pixel cubierto por asentamientos	% of Pixel cubierto por suelo desnudo
Tipo de Ecosistema																					
Acuícola	-23%	-17%	-14%	-11%	2%	10%	-22%	13%	93%	-2%	527%	0%	-99%	-8%	7%	4%	4%	8%	27%	334%	-34%
Agrícola anual	14%	7%	3%	4%	-2%	0%	2%	9%	6%	-3%	67%	44%	-9%	-2%	-2%	-1%	1%	-4%	-3%	38%	37%
Agrícola perenne	4%	2%	4%	2%	2%	1%	1%	3%	5%	-4%	103%	86%	31%	-2%	-6%	6%	-2%	-11%	-5%	94%	83%
Asentamientos humanos	40%	27%	14%	20%	8%	19%	22%	32%	21%	-4%	80%	117%	-46%	-2%	33%	37%	34%	33%	0%	3%	-23%
Bosque cultivado	5%	11%	8%	3%	10%	-1%	-1%	19%	17%	-4%	194%	-67%	-49%	-3%	-28%	15%	-22%	-35%	46%	-34%	249%
Bosque de coníferas	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	-1%	8%	6%	6%	-3%	-1%	7%	-3%	1%	-29%	426%	172%
Bosque de encinos	0%	-1%	-2%	-1%	-1%	0%	-1%	-1%	-2%	-1%	32%	2%	19%	-2%	-2%	8%	-8%	2%	-14%	308%	319%
Bosque mesófilo de montaña	1%	1%	2%	2%	3%	1%	1%	1%	1%	-2%	48%	13%	-15%	-2%	0%	9%	4%	-4%	-2%	916%	35%
Especial Otros Tipos Leñoso	-2%	-2%	-2%	0%	-2%	1%	0%	2%	1%	0%	1%	53%	-5%	0%	-4%	0%	-3%	-4%	1%	276%	203%
Especial Otros Tipos No Leñoso	-6%	7%	11%	1%	6%	1%	3%	11%	15%	-1%	366%	-15%	-54%	-2%	-3%	8%	3%	-9%	22%	180%	-25%
Matorral Xerófilo Leñoso	-1%	0%	2%	1%	4%	1%	2%	2%	0%	0%	100%	132%	-4%	0%	-13%	-4%	-17%	-10%	6%	187%	19%
Matorral Xerófilo No Leñoso	-15%	-13%	-7%	-14%	-5%	-10%	-3%	-6%	-6%	0%	7378%	314%	-10%	0%	-2%	13%	-9%	4%	48%	487%	16%
Otras Tierras	-5%	19%	18%	6%	3%	14%	23%	17%	13%	-2%	311%	109%	-24%	-3%	24%	35%	17%	30%	4%	483%	-20%
Pastizal	10%	5%	5%	2%	1%	1%	3%	6%	5%	-2%	66%	99%	56%	-1%	-7%	3%	-5%	-8%	-16%	199%	154%
Selva Caducifolia	1%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	1%	0%	-2%	0%	74%	34%	-3%	-2%	10%	-11%	3%	-18%	72%	114%
Selva Perennifolia	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	-4%	2%	12%	-92%	-2%	-9%	3%	-8%	-11%	1%	95%	-1%
Selva Subcaducifolia	2%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	-2%	4%	48%	527%	-2%	-9%	0%	-7%	-10%	-27%	7%	167%
Vegetación Hidrófila Leñosa	-1%	-1%	1%	-1%	0%	-1%	0%	-2%	2%	-1%	10%	-1%	-23%	-2%	-8%	6%	-6%	-12%	-5%	75%	-21%
Vegetación Hidrófila No Leñosa	8%	3%	18%	5%	8%	3%	8%	5%	6%	-4%	29%	-18%	-98%	-3%	-19%	9%	-11%	-28%	10%	9%	11%

promedio a la altura del pecho presentan decrementos importantes en el matorral xerófilo no leñoso. Otras variables estructurales con decaimiento moderado en sus valores fueron la *desviación estándar del diámetro promedio a la altura del pecho (DAP)* y la *probabilidad de presencia de árboles muertos en pie*. Estas dos variables se relacionan, la primera, con la pirámide de edades del arbolado y la segunda, con la intervención humana para cosechar leña o carbón. Por lo tanto, se interpretan como indicadoras de perturbación por acción humana mediante extracción de madera y combustible, en la que se homogeneiza la estructura del ecosistema, o bien, a la presencia de agentes que induzcan la mortalidad de las especies arbóreas, como podrían ser las plagas.

Ninguna de las variables funcionales incrementó en sus valores durante el periodo observado. Alrededor de la mitad presenta cambios mínimos o nulos en la mayoría de los ecosistemas, mientras que en el resto hay un decremento. La *probabilidad de presencia de plagas en árboles*, la *fotosíntesis neta promedio anual*, la *fotosíntesis neta en temporada de secas* y la *fotosíntesis neta promedio en temporada de lluvias* muestran decrementos en la mayoría de los ecosistemas, tanto naturales como antrópicos. Los valores de decaimiento más elevados

se registraron en la agricultura permanente, matorral xerófilo leñoso, pastizal, selva caducifolia, y vegetación hidrófila. Es posible que este decaimiento generalizado en las tasas fotosintéticas sea debido a cambios en la composición de especies vegetales de los ecosistemas, lo cual también es indicador de perturbación.

De acuerdo con lo anterior, las variables de presión mostraron incrementos notables en la mayoría de los casos. El % de *pixel cubierto por asentamientos humanos* y el % de *pixel con suelo desnudo* incrementaron en la mayoría de los ecosistemas. En contraste, el % de *pixel cubierto por crecimiento herbáceo* disminuyó, sobre todo en los bosques de encino y coníferas, el pastizal, selva caducifolia y selva subcaducifolia. Probablemente, estos decrementos son el resultado de cambios de uso de suelo hacia asentamientos humanos, aunque también podría ocurrir abandono de campos de cultivo y procesos de regeneración natural, o bien, por las tendencias del incremento de áreas de bosque cultivado para la producción maderable impulsada durante la última década (PRONAFOR, 2018).

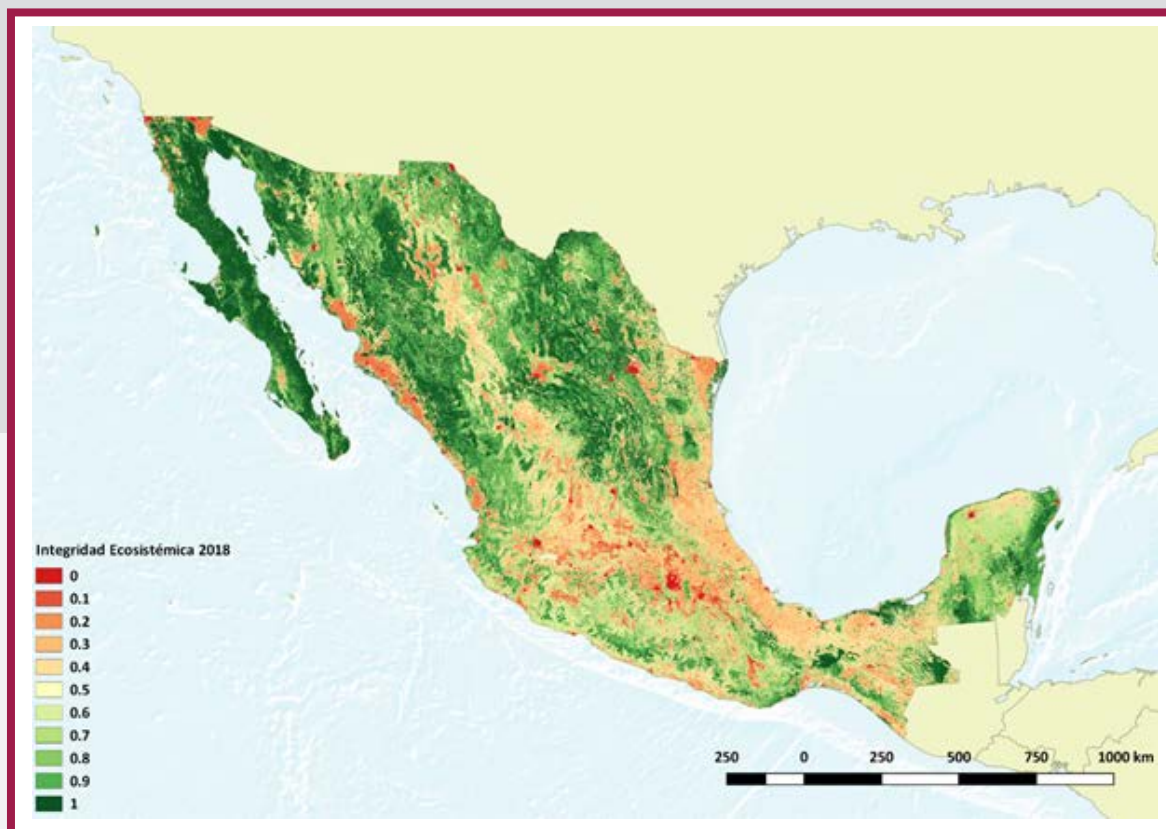
Los ecosistemas que presentaron los cambios más extremos son los antrópicos (acuícola, agrícola anual, agrícola perenne, asentamientos humanos y bosque cultivado) y también algunos naturales (matorral xerófilo no leñoso, la selva perennifolia y la vegetación hidrófila).

5.4.2 Etapa 3. Medida agregada de la condición del ecosistema

5.4.2.1 Índice de Integridad Ecosistémica

El IIE a nivel nacional (mapa 5-1) muestra que, en general, la región norte y noroeste tienen una integridad elevada, así como la zona montañosa del Pacífico sur y la zona oriente de la península de Yucatán. La integridad fluctúa entre moderada y alta en el centro y norte de la península de Yucatán. Por último, resalta la de moderada a baja en la región central del país, así como la planicie costera del Golfo de México. Asimismo, las costas de Sonora, Sinaloa y Nayarit presentan una con valores que tienden a ser muy bajos.

Mapa 5-1. Índice de Integridad Ecosistémica para los ecosistemas terrestres de México en 2018 (celdas de 250 X 250 m o 6.25 ha)



Fuente: elaboración propia.

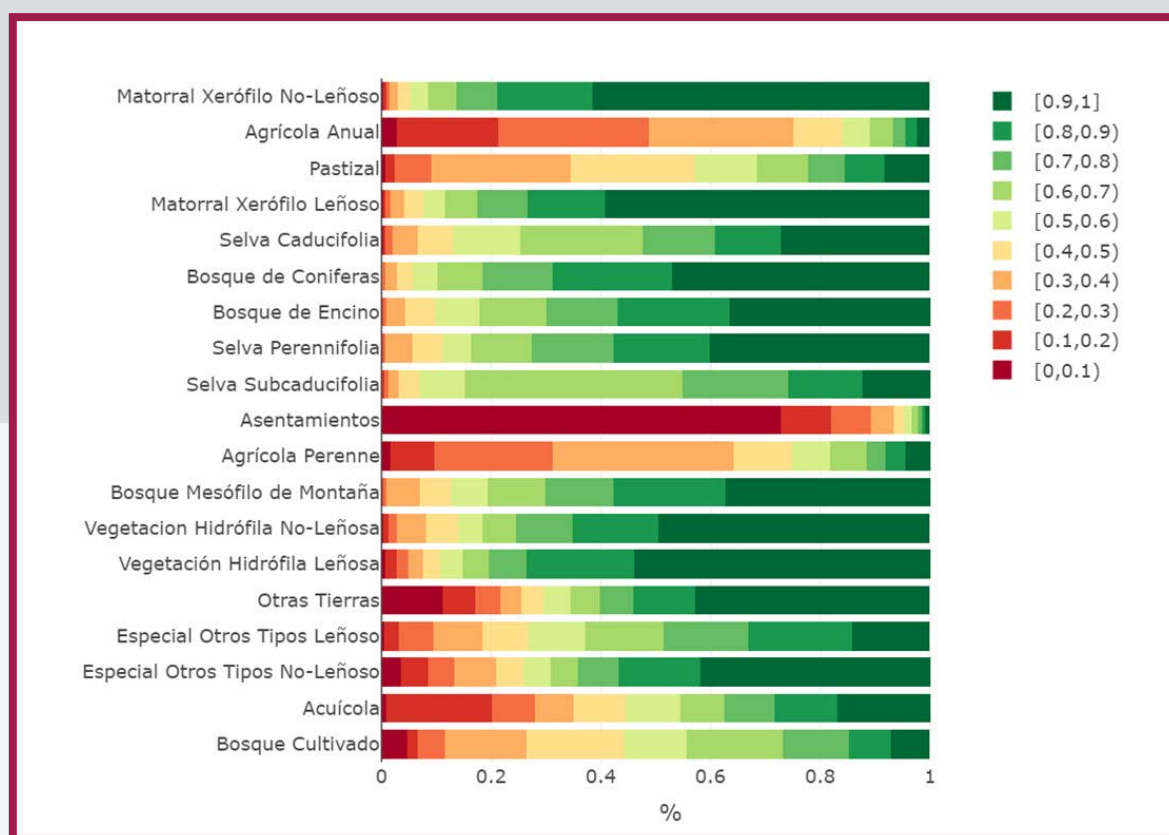
Los grandes centros urbanos, como la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Mexicali, Tijuana, Mérida y Cancún, tienen valores de integridad muy bajos.

Las razones de los bajos niveles de integridad son congruentes con lo que ocurre a nivel mundial, la conversión de ecosistemas por agricultura, potreros e infraestructura urbana, principalmente. Por ejemplo, en el caso de la planicie costera del Golfo de México, la mayoría de los ecosistemas naturales han sido transformados para actividades de agricultura y ganadería. Aunado a lo anterior, la región del Bajío (zona centro de México) también presenta una baja integridad ecosistémica, lo que coincide con el cambio del uso del suelo desde tiempos coloniales y a las diversas actividades económicas que se realizan actualmente. Estos cambios

han generado ganancias económicas, pero también degradación ambiental. De igual manera, la costa del Pacífico, entre Sinaloa, Sonora y Nayarit, presenta una fuerte degradación debida a las intensas actividades agrícolas que se desarrollan en esta región.

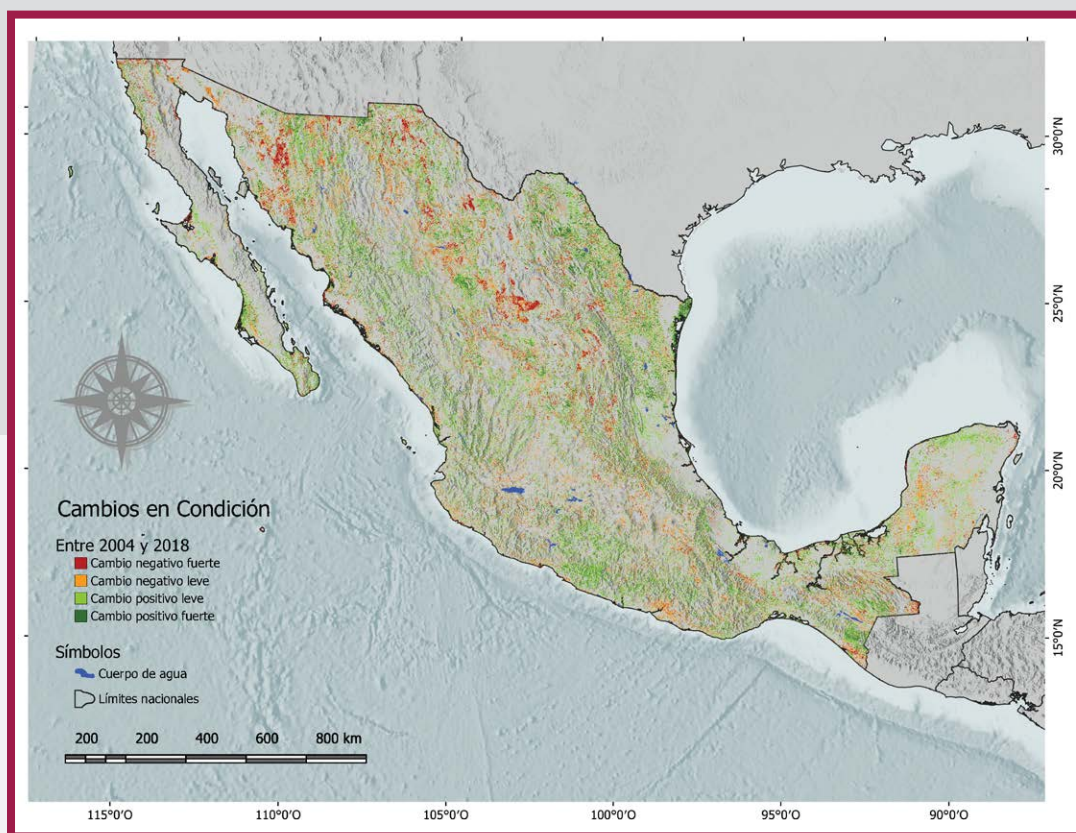
Solo alrededor de 25 % de la superficie de la selva caducifolia y aproximadamente 10 % de la selva subcaducifolia se encuentran con valores altos de integridad. Entre 40 y 60 % de la extensión de matorral xerófilo no leñoso y matorral xerófilo leñoso, vegetación hidrófila leñosa y no leñosa, bosque de coníferas, selva perennifolia, bosque de encino y bosque mesófilo de montaña tienen una integridad elevada. El 70 % de la extensión de los asentamientos humanos cuentan con una muy baja. Alrededor de 20 % de las zonas agrícolas anuales y perennes presentan integridad muy baja (valores entre 0 y 0.2) y 50 %, baja (valores entre 0.3 y 0.5). La de los bosques cultivados es heterogénea, en su mayoría en niveles moderados (figura 5-7).

Figura 5-7. Distribución proporcional de la integridad ecosistémica agregada de acuerdo con las categorías del INEGI para 2018



Con base en la metodología del IIE, se tienen comparaciones preliminares entre 2004 y 2018 (cuadro 5-5, mapa 5-2). La mayor parte de los cambios en el valor del Índice analizados entre 2004 y 2018 se observan en la zona centro-norte del país, lo que coincide, en general, con la región con mayores índices de integridad. Se aprecian zonas extensas de cambios negativos en la región de los desiertos de Sonora y de Chihuahua, lo cual coincide con lo observado en cuanto a reducción de matorral xerófilo. En cambio, en Coahuila de Zaragoza y Nuevo León se aprecian manchones con cambios positivos.

Mapa 5-2. Mapa de cambios en el valor del Índice de Integridad Ecosistémica entre 2004 y 2018



Se reportan como cambios las diferencias del valor del IIE entre los dos años mayores de 0.33 (cambios positivos fuertes); entre 0.17 y 0.33 (positivos leves) y menores -0.33 (negativos fuertes); entre -0.17 y -0.33 (negativos leves). Esto corresponde a una y dos desviaciones estándar, respectivamente, a la derecha y a la izquierda de la diferencia de las medias de los dos años comparados (ver recuadro dentro del mapa).

Fuente: elaboración propia.

En el resto del país, los cambios son menores. Es relevante notar que algunas zonas muestran cambios nulos o mínimos, como la planicie costera del Golfo de México y la zona del Bajío, en el centro de México. Lo anterior está relacionado con que estas zonas tenían baja integridad ecosistémica al inicio del periodo de análisis, como resultado de un importante proceso de alteración de los ecosistemas originales. El costo ambiental del desarrollo económico de estas zonas ha sido alto y extenso.

En 2004, los ecosistemas que presentaron los valores de condición más altos y que, en consecuencia, mostraron una mejor integridad son los matorrales xerófilos tanto leñosos como no leñosos, el bosque de coníferas y la vegetación hidrófila leñosa (cuadro 5-5). Los valores

Cuadro 5-5. Cambios en la contabilidad de la condición de los diferentes ecosistemas

inegi_id	Tipo de Ecosistema	Condición		
		Valor de apertura 2004	Valor de apertura 2018	Cambio
1	Acuicola	0.78	0.55	-0.23
2	Agrícola anual	0.34	0.35	0.00
3	Agrícola perenne	0.41	0.41	0.00
4	Asentamientos humanos	0.12	0.10	-0.03
5	Bosque cultivado	0.55	0.55	0.00
6	Bosque de coníferas	0.81	0.83	0.02
8	Bosque de encinos	0.77	0.78	0.02
10	Bosque mesófilo de montaña	0.76	0.78	0.02
12	Espedial Otros Tipos Leñoso	0.65	0.65	0.00
14	Espedial Otros Tipos No Leñoso	0.74	0.72	-0.02
17	Matorral Xerófilo Leñoso	0.84	0.85	0.01
19	Matorral Xerófilo No Leñoso	0.88	0.87	-0.01
21	Otras Tierras	0.81	0.68	-0.13
22	Pastizal	0.47	0.52	0.05
23	Selva Caducifolia	0.70	0.73	0.02
25	Selva Perennifolia	0.78	0.79	0.01
27	Selva Subcaducifolia	0.69	0.71	0.01
29	Vegetación Hidrófila Leñoso	0.81	0.83	0.01
31	Vegetación Hidrófila No Leñoso	0.74	0.81	0.07

En amarillo se resaltan los ecosistemas producto de las actividades humanas. Es importante tener en cuenta que la categoría pastizal incluye pastizales de origen natural y antrópico. El rojo indica decremento y el verde, incremento en la integridad de los ecosistemas entre 2004 y 2018.

de integridad más bajos se encontraron en las clases agrícola perenne, agrícola anual y, por último, asentamientos humanos. Las mismas tendencias se observaron en 2018, donde los matorrales xerófilos no leñosos y leñosos ocuparon los primeros lugares en integridad; por el contrario, los asentamientos humanos, junto con las clases agrícola perenne y anual, estuvieron en los últimos lugares.

En el análisis de los cambios en integridad entre 2004 y 2018 se observa un incremento en la integridad ecológica del pastizal, la selva caducifolia, el bosque mesófilo de montaña, el bosque de coníferas, el bosque de encino, la vegetación hidrófila leñosa, la vegetación hidrófila no leñosa, el matorral xerófilo leñoso, la selva subcaducifolia y la selva perennifolia. En contraste, la integridad de las actividades acuícolas tuvo un notable decremento, al mismo tiempo que la degradación de los asentamientos humanos también aumentó. Los únicos ecosistemas naturales en los que se registró un decremento en integridad son especial otros tipos no leñoso, el matorral xerófilo no leñoso y, sobre todo, otras tierras.

Una tendencia interesante fue que, a pesar de la reducción en la extensión de la selva caducifolia, el pastizal, el matorral xerófilo leñoso, la selva perennifolia y el matorral xerófilo no leñoso, sus valores de integridad aumentaron. Contrario a lo anterior, el incremento en la extensión de cultivos acuícolas resultó en un notable decremento en su integridad.

5.4.3 Extensión efectiva de los ecosistemas e Índice de Capital Natural

La integridad de algunos ecosistemas naturales es alta y cubre una extensión importante (figura 5-8). El matorral xerófilo no leñoso es el ecosistema más extenso (366 598 km²) y, además, es el que se encuentra en mejor condición. Los pastizales son muy extensos, pero con una condición baja.²¹ El matorral xerófilo leñoso ocupa el cuarto lugar en cuanto a extensión y también, en su mayoría, se encuentra con buena integridad. Aunque en menor magnitud, los bosques de coníferas y encino también presentan una extensión importante e integridad ecosistémica relativamente alta. El bosque mesófilo tiene muy poca extensión y su integridad es entre media y muy alta. Las selvas son el tercer tipo de ecosistemas más extenso y su condición es muy variable. La selva baja subcaducifolia es la que ocupa la menor extensión y que además su integridad es baja.

21 Es importante notar que la categoría pastizal incluye pastizales de origen natural y antrópico.

Los usos de suelo antrópicos pueden ser extensos y tienen integridades muy bajas (figura 5-8). La clase agrícola anual tiene la mayor extensión dentro de los usos de suelo con una integridad muy reducida. La extensión de los asentamientos humanos ya es mayor que la de algunos ecosistemas (como, por ejemplo, el bosque mesófilo de montaña) y muestra los valores más bajos de integridad.

Al ser el producto de la condición por la extensión, el Índice de Capital Natural puede entenderse como la extensión efectiva relativa a su extensión intacta que ocupa un ecosistema en el territorio. Así, la extensión efectiva de algunos tipos de vegetación se ha reducido notablemente debido a la pérdida de integridad. Por ejemplo, la del pastizal en 2014 cubría 308 219 km² (*Capítulo 4*), pero equivaldría a una *extensión efectiva* casi 50 % menor (160 753 km²) si consideramos el grado de integridad con el que permanece (figura 5-9).

Figura 5-8. Extensión e integridad ecosistémica agregada de acuerdo con las categorías de vegetación del INEGI para 2018

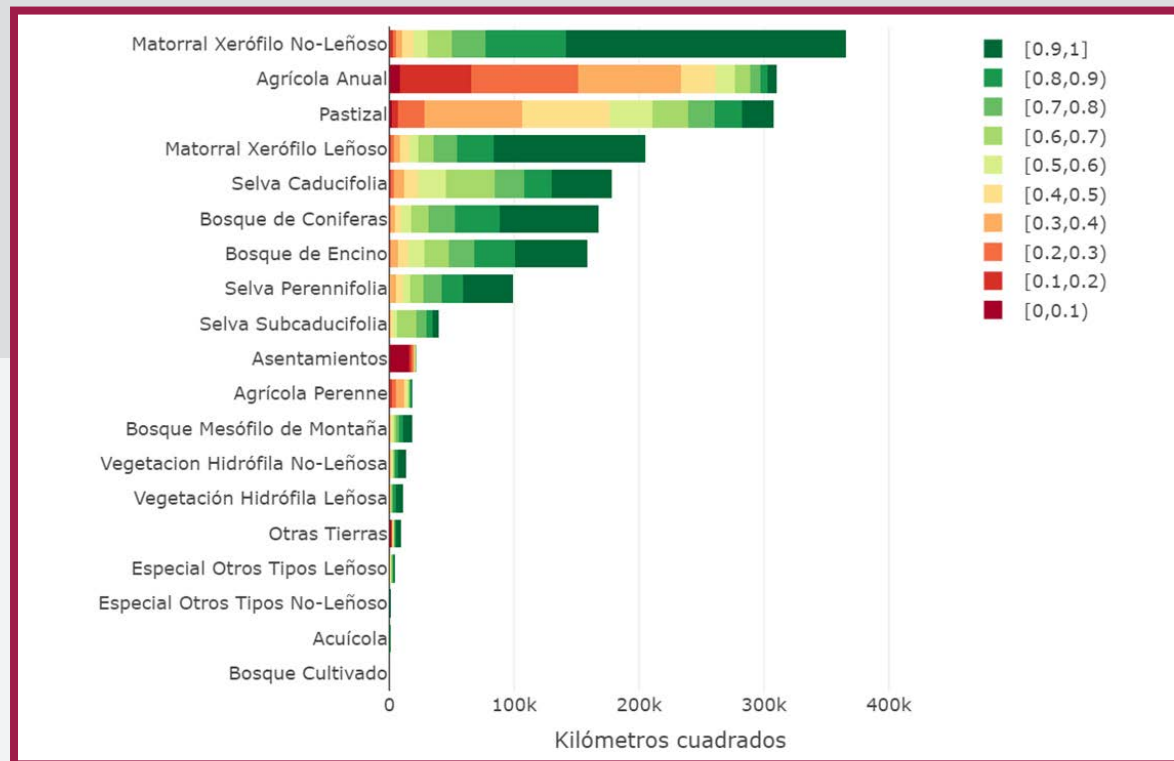
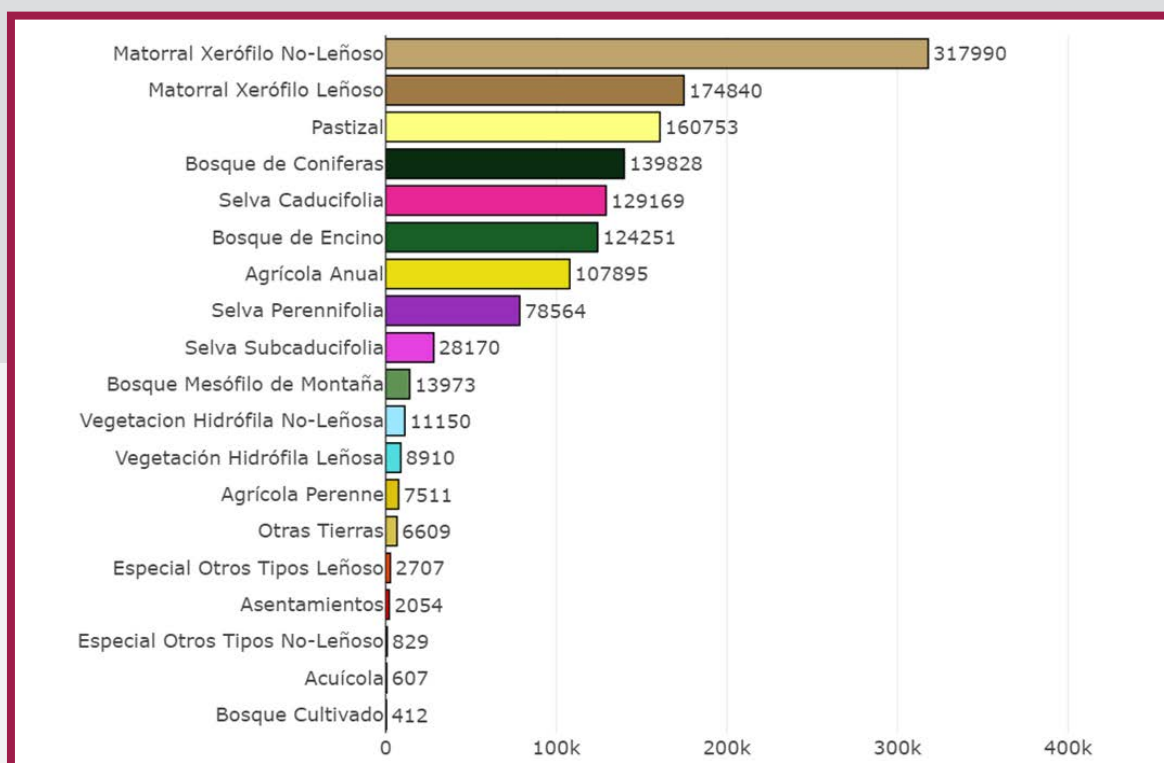


Figura 5-9. Extensión efectiva de los ecosistemas terrestres de México para 2018

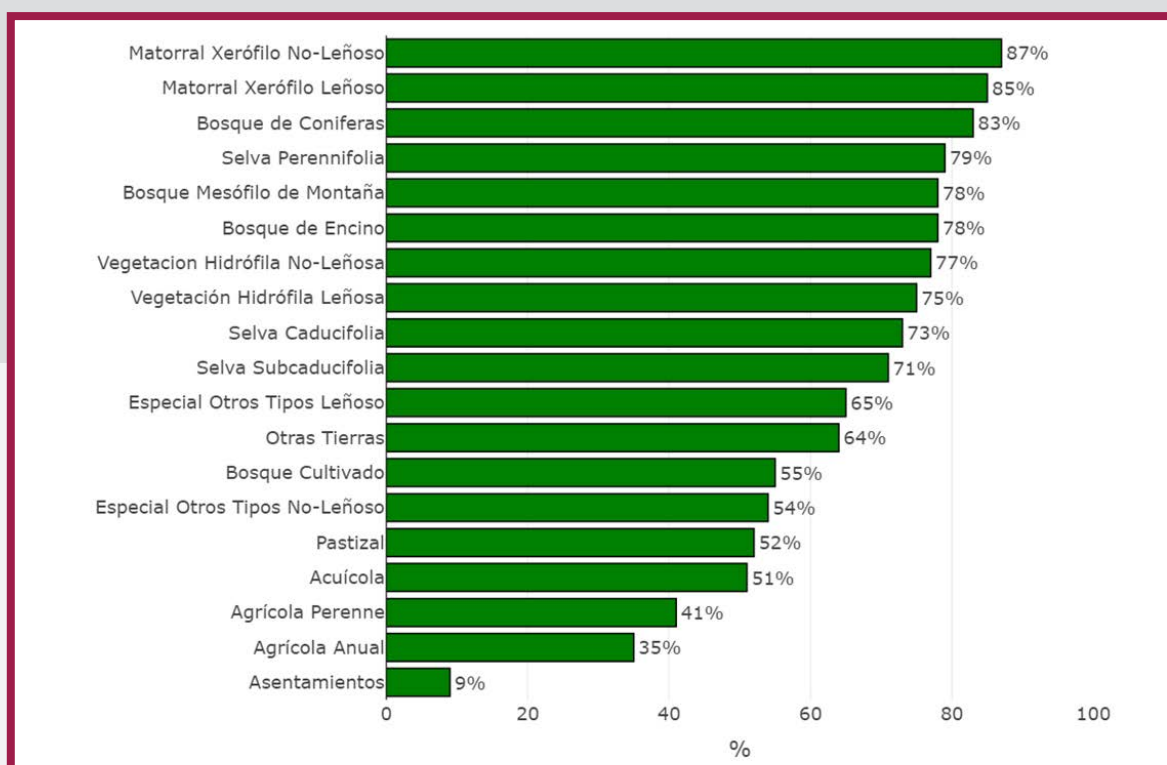


Bajo un escenario de no intervención humana, un ecosistema expresaría el máximo valor de capital natural al mantener la totalidad de su extensión original con integridad plena (el Índice sería 100 %). Esta condición puede representarse, como se ha mencionado arriba, en términos físicos de extensión (*extensión x integridad*, figura 5-9) o relativos (extensión efectiva) referidos a la unidad territorial de interés (tipo de ecosistema, cuenca, estado, municipio, etcétera).

En términos relativos, es posible señalar que México aún mantiene alrededor de 65 % del capital natural original (figura 5-10). Porcentualmente, los ecosistemas naturales que mayor capital natural mantienen son el matorral xerófilo no leñoso (87 %); el matorral xerófilo leñoso (85 %) y el bosque de coníferas (83 %); la selva caducifolia, el bosque de encino, la selva perennifolia, la selva subcaducifolia, el bosque mesófilo de montaña y la vegetación hidrófila leñosa y no leñosa mantienen entre 70 y 80 % de su capital natural. No obstante, el bosque mesófilo de montaña y la vegetación hidrófila leñosa y no leñosa contribuyen escasamente al capital natural del país debido a su baja extensión. Los ecosistemas naturales que menor capital natural con-

servan son: otras tierras (64 %), especial otros tipos no leñosos (65 %), selva subcaducifolia (71 %) y selva caducifolia (73 %). El capital natural contenido en el pastizal es de 52 % (ver nota 21 a pie de página). Los usos de suelo que mayor capital natural conservan dentro de ellos son el bosque cultivado (55 %), acuícola (51 %) y agrícola perenne (41 %). Los asentamientos solo conservan dentro de ellos 9 % del capital natural; la clase agrícola anual, 35 %; y la agrícola perenne, 41 por ciento.

Figura 5-10. Capital natural para los ecosistemas terrestres de México en 2018



El valor correspondiente al área efectiva en el periodo de 2002 a 2004 fue mayor en los ecosistemas naturales, como: el matorral xerófilo no leñoso y leñoso, el bosque de coníferas y selva caducifolia. La disminución más relevante de capital natural se presentó en los de matorral xerófilo no leñoso (pérdida en extensión y la reducción en condición) y matorral xerófilo leñoso, selva perennifolia y selva caducifolia; en estos últimos tres, la disminución en el valor de capital natural está asociada con la reducción en extensión.

También, se observó que el valor del capital natural de la vegetación hidrófila leñosa y no leñosa tuvo un ligero aumento entre 2002 y 2018, principalmente debido a un incremento en su condición.

Cuadro 5-6. Contabilidad de la extensión y extensión efectiva de los diferentes ecosistemas

inegi_id	Tipo de Ecosistema	Extensión			Extensión efectiva		
		Valor de apertura 2002 (km ²)	Valor de apertura 2014 (km ²)	Cambio (km ²)	Valor de apertura 2002-2004*	Valor de apertura 2014-2018*	Cambio
6	Bosque de coníferas	168,673	167,826	-847	137,184	139,828	2,644
8	Bosque de encinos	156,366	158,295	1,929	120,105	124,251	4,146
10	Bosque mesófilo de montaña	18,252	17,966	-286	13,786	13,973	187
12	Especial Otros Tipos Leñoso	4,279	4,171	-108	2,778	2,707	-71
14	Especial Otros Tipos No Leñoso	1,562	1,537	-25	872	829	-43
17	Matorral Xerófilo Leñoso	211,462	205,651	-5,811	176,842	174,840	-2,002
19	Matorral Xerófilo No Leñoso	370,318	366,598	-3,719	326,549	317,990	-8,559
21	Otras Tierras	9,493	10,279	785	7,269	6,609	-660
22	Pastizal	315,257	308,219	-7,038	148,576	160,753	12,177
23	Selva Caducifolia	179,643	178,037	-1,606	125,979	129,169	3,190
25	Selva Perennifolia	105,222	99,436	-5,786	81,734	78,564	-3,170
27	Selva Subcaducifolia	47,599	39,855	-7,744	32,995	28,170	-4,825
29	Vegetación Hidrófila Leñosa	11,290	11,737	447	8,446	8,910	464
31	Vegetación Hidrófila No Leñosa	14,278	14,276	-2	10,410	11,150	740

Los valores de extensión corresponden a los reportados en el *Capítulo 4* y es el área cubierta por cada tipo de ecosistema sin considerar su condición. Los valores de extensión efectiva para cada tipo de vegetación es la suma de los productos obtenidos de la cobertura de cada celda de ese tipo de vegetación multiplicada por su condición (ver sección 5.3.2), es decir, la extensión efectiva corresponde a la extensión de los ecosistemas ponderada por su condición. En rojo se indica decremento y en verde, incremento.

* Debido al desfase de fechas entre los productos que se utilizaron para calcular extensión y condición, el valor de extensión efectiva está referido a estos periodos.

5.4.4 Relación entre los índices de Integridad Ecosistémica y de Huella Humana, así como con las categorías primaria y secundaria de vegetación

Como se describe en el *Anexo 9.2* de este informe, se construyó un *dispositivo de interoperabilidad* como una propuesta para facilitar el transitar entre las distintas clasificaciones y representaciones cartográficas de extensión y condición de los ecosistemas que se usan en este proyecto. Al respecto, y para la cuenta de condición, es de particular interés realizar este ejercicio para comprender la relación entre el Índice de Integridad Ecosistémica, el Índice de Huella Humana y la vegetación primaria y secundaria. Esta última caracterización de la vegetación, aunque difícil de precisar numéricamente, se utiliza con cierta amplitud en México. Se consideró pertinente explorar estos dos conceptos de manera focal y enmarcarlos en el contexto de la conveniencia de construir mecanismos computacionales que faciliten la interoperabilidad. Una noción importante por valorar es que las múltiples representaciones ecosistémicas mantienen distintos niveles de correlación (asociación o dependencia estadística), por lo que los modelos probabilísticos gráficos, en especial los de redes bayesianas, son idóneos para este propósito.

5.4.4.1 Relación entre los índices de Integridad Ecosistémica y de Huella Humana

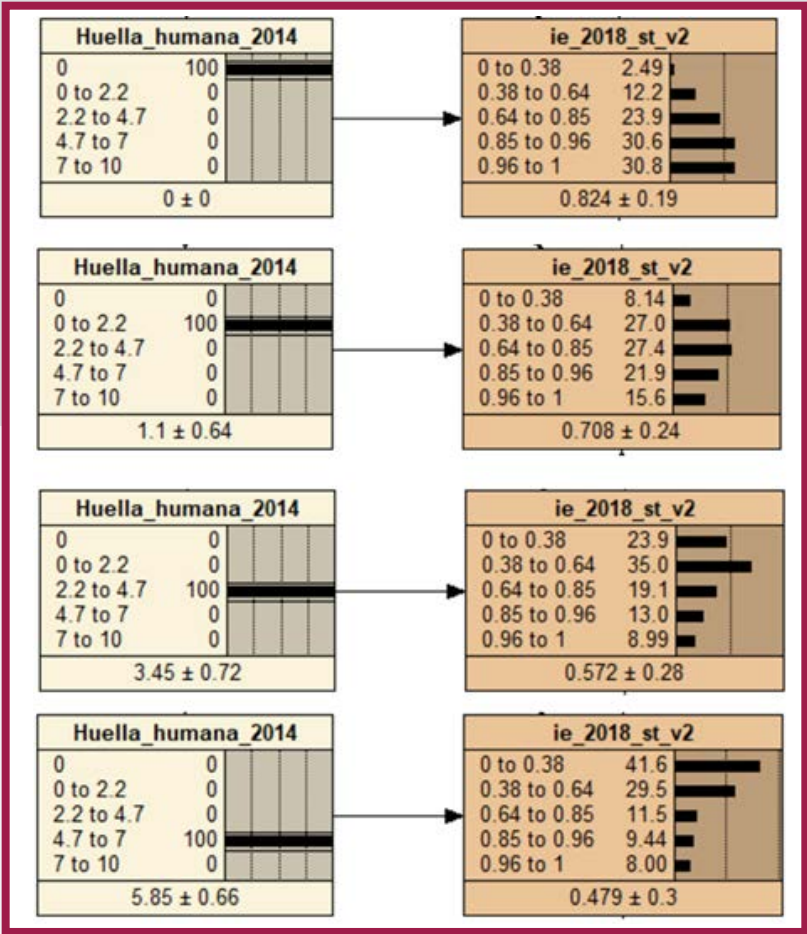
Inicialmente, estos dos índices se evaluaron como alternativas para medir la condición de los ecosistemas (Sánchez Colón, 2019). También, se apreció que el Índice de Huella Humana es un indicador de presión que denota, en términos relativos, en qué medida las presiones humanas pueden modificar los entornos naturales y, por lo tanto, no mide directamente la condición de los ecosistemas. Este tipo de análisis indirecto suele realizarse cuando hay pocos datos disponibles sobre el estado de un ecosistema y, por ello, utilizar datos de variables de presión es

una forma de estimar la condición en la que podría estar (UN, 2021). En este sentido, la identificación y documentación de las presiones es un sustituto útil, siempre y cuando la relación entre presión y estado esté bien entendida y justificada (Bland *et al.*, 2018). Sin embargo, en ocasiones, la relación no es directa. Pueden ocurrir retrasos considerables entre la evidencia de una presión y la manifestación evidente de los cambios que indujo. Una forma de valorar la asociación entre ambos índices se obtiene a través de la correlación que tengan. En caso de ser muy alta, se podría incluso considerar que son equivalentes y que podrían ser realmente utilizados indistintamente uno u otro. En este apartado se presentan resultados preliminares del análisis de esta relación medida entre 2014 y 2018, que es el intervalo para el cual existe disponibilidad de datos de ambos índices.

Los resultados obtenidos mostraron que existe una correlación entre los índices de Huella Humana y de Integridad Ecosistémica de alrededor de 0.59 %, la cual es positiva, pero no muy alta. En consecuencia, en general, la red bayesiana construida para interoperar entre distintas caracterizaciones ecosistémicas y de presión humana sobre ellos muestra una buena concordancia entre la huella humana y la integridad ecológica (figura 5-11). Por ejemplo, cuando la huella humana es inexistente (valor cero), los valores de integridad muestran una tendencia a alcanzar valores altos o muy altos, indicando la presencia de ecosistemas bien conservados. Conforme el valor de huella humana incrementa la distribución de los valores de integridad también se modifican, aumentando la frecuencia de los valores de integridad más bajos. Por último, cuando la huella humana tiene los valores más elevados, la integridad ecosistémica es predominantemente baja o muy baja, con muy poca frecuencia de valores altos de integridad, sugiriendo la presencia de ecosistemas claramente degradados.

Dada la importancia que tiene para la gestión de ecosistemas detectar las causas de los cambios en su condición, es necesario explorar la posibilidad de establecer la relación entre ambos indicadores desde este enfoque causal. Además, algunas de las actividades humanas son directamente acciones de cosecha de servicios ecosistémicos que generan flujos económicos al mismo tiempo que degradan la condición de los ecosistemas intervenidos. Cabe recordar que el Índice de Integridad Ecosistémica evalúa el estado de los ecosistemas con base en características bióticas y puede incluir indicadores de presión. En este sentido se recomienda realizar un ejercicio para desarrollar una modelación en la que, además de las variables de presión evaluadas en la versión actual del Índice se incluyan aquellas que conforman el Índice de Huella Humana e incluso algunas otras que pudieran estar afectando la condición de manera positiva o negativa. La estructura de la red para el cómputo interoperable entre las distintas clasificaciones ecosistémicas y de apropiación humana que se ha propuesto en este estudio piloto abre una atractiva posibilidad de cómputo que facilita la comprensión e interpretación para distintos contextos del efecto, por ejemplo, de distintas políticas sobre el estado de los ecosistemas.

Figura 5-11. Relación entre los nodos de huella humana (2014) e Índice de Integridad Ecosistémica (2018)



Las barras indican la probabilidad (en porcentaje) de que cada uno de los índices se encuentre en las cinco categorías en las que se subdividieron los valores de cada índice. Valores cercanos a cero para el Índice de Huella Humana indican poca afectación y valores cercanos a cero para el Índice de Integridad Ecosistémica, una condición muy baja.

5.4.4.2 Relación entre el Índice de Integridad Ecosistémica y la vegetación primaria y secundaria

Las cartas de uso de suelo y vegetación del INEGI tienen un alcance nacional, son espacialmente explícitas, generadas por una dependencia con reconocimiento oficial, consideradas información de interés nacional y cubren varios años, aspectos considerados como esenciales para la implementación del SEEA EA. A partir de la serie II de vegetación y uso del suelo (INEGI, 2001), el INEGI realiza una evaluación de la condición de los ecosistemas al separar en al menos dos estados sucesionales los tipos de vegetación natural (INEGI, 2012). Considera como vegetación primaria a la que no presenta alteración evidente y secundaria al estado sucesional en el que hay indicios de que ha sido eliminada o perturbada (nótese el amplio espectro con el que se le caracteriza), ya sea por causas naturales o antropogénicas, a un grado que ha sido modificada sustancialmente. La clasificación se realiza con base en opinión de expertos, quienes evalúan los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo y también el grado de erosión del suelo.

Es importante resaltar que la información obtenida de los expertos es invaluable para conocer la condición de la vegetación de manera cualitativa desde hace varios años y seguirá siéndolo en el futuro. Sin embargo, para un ejercicio de contabilidad, el análisis de la condición de los ecosistemas en términos de vegetación primaria y secundaria no permite estimarla dentro de las categorías asociadas a usos del suelo (por ejemplo, asentamientos, cultivos etc.); además, al estar basada en la opinión de expertos, resulta difícil reproducir los resultados y no está diseñada para incorporar variables que permitan evaluar la condición en función de otras características importantes en el funcionamiento de los ecosistemas como, por ejemplo, la presencia de fauna. Finalmente, al ser una clasificación dicotómica (vegetación primaria y secundaria) se pierden los distintos matices de la condición que pueden ser importantes en la gestión y el manejo de ecosistemas, especialmente los indicativos de alerta temprana al daño ambiental severo.

No obstante, a través del dispositivo de **interoperabilidad** es posible estimar con bastante confiabilidad la relación entre el Índice de Integridad Ecosistémica y la distinción entre vegetación primaria y secundaria de la clasificación del INEGI. De esta manera se puede aprovechar la existencia de una clara correspondencia entre ambas estimaciones. Además, también da validez al enfoque elegido en este piloto de optar por una escala continua que da cuenta de manera natural a la gradación que caracteriza al proceso sucesional de cualquier ecosiste-

ma, aceptando que las dos categorías del INEGI son una representación gruesa del mismo proceso. Como parte de este ejercicio piloto se exploró cuantitativamente la relación entre la integridad ecosistémica y la dicotomía de vegetación primaria y secundaria. A continuación, se presentan resultados para los datos correspondientes a 2018 (cuadro 5-7).

Cuadro 5-7. Valores del Índice de Integridad Ecosistémica (en porcentaje: 0 no íntegro, 100 totalmente íntegro) para vegetación primaria y secundaria

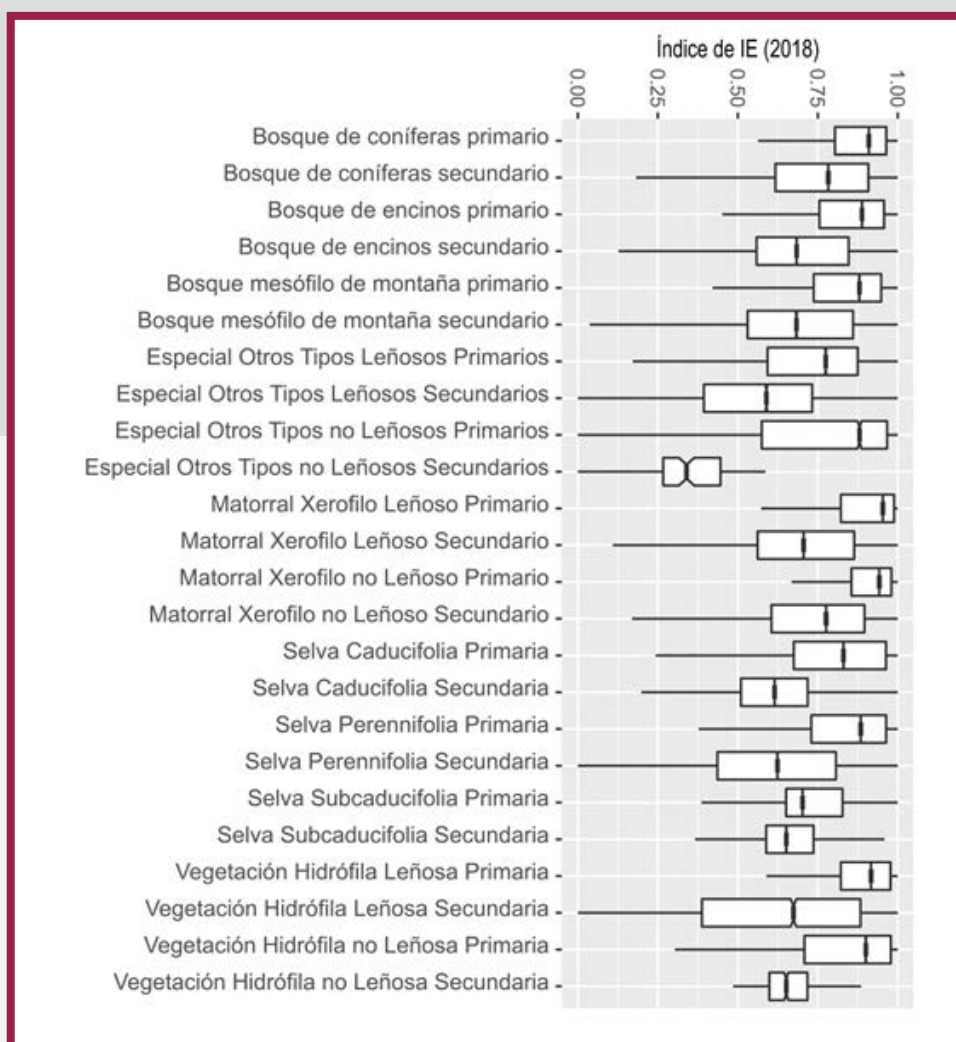
Tipo de vegetación	Índice de Integridad Ecosistémica (2018)	
	Primario	Secundario
Bosque de coníferas	86.0	74.8
Bosque de encino	83.3	68.4
Bosque mesófilo de montaña	81.6	67.8
Especial otros tipos leñosos	70.9	57.2
Especial otros tipos no leñosos	75.0	38.8
Matorral xerófilo leñoso	87.5	68.2
Matorral xerófilo no leñoso	88.2	72.7
Selva caducifolia	80.0	61.9
Selva perennifolia	83.0	63.0
Selva subcaducifolia	73.0	65.7
Vegetación hidrófila leñosa	84.7	62.9
Vegetación hidrófila no leñosa	80.7	68.5

En todos los casos, y en cualquier tipo de vegetación, la integridad de la vegetación primaria es significativamente mayor en comparación con la secundaria ($T_{paired} = 0.042$). Esto significa que los atributos estructurales y de función están en mejor condición en la primaria en comparación con su contraparte secundaria.

El análisis también hace evidente que el Índice de Integridad Ecosistémica muestra una amplia variación para todos los tipos de vegetación analizados. Sin embargo, la variación es mayor para el caso de la secundaria que en su contraparte primaria, como cabría esperar de la aproximación metodológica que se utiliza para generarla, como se anotó arriba (figura 5-12). Al igual que se apreció al explorar los valores esperados de integridad ecosistémica, al ver la distribución completa de valores queda claro que los valores de integridad de la vegetación secundaria son menores que lo calculado para la primaria. La mayor variación en la vegetación secundaria (sobre todo en los valores bajos de integridad) es indicativa de la amplia variabilidad y heterogeneidad que tienen estos tipos de vegetación, los cuales, por definición, están más perturbados que la primaria.

La distinción entre primaria y secundaria no permite apreciar esta variabilidad, como sí ocurre con el Índice de Integridad Ecosistémica. Esto es relevante en la gestión de los ecosistemas terrestres de México. No obstante, es muy importante no desechar la información que aporta la aproximación dicotómica para la evaluación de la condición de estos. Dicha información permite ver en una serie amplia de tiempo los cambios gruesos que se han producido en los distintos tipos de vegetación.

Figura 5-12. Diagrama de cajas para los valores del Índice de Integridad Ecosistémica (2018) de los ecosistemas terrestres de México



5.5 Discusión

La condición de los ecosistemas de México es heterogénea. En general, la región norte y noreste tienen una integridad elevada; esta última puede estar influida por la presencia de grandes extensiones de bosques de coníferas, que son unos de los ecosistemas con mayor Índice de Integridad Ecosistémica. La zona montañosa del Pacífico sur y la oriente de la península de Yucatán poseen también un alto IIE. Las zonas con menor integridad ecosistémica se encuentran en la planicie costera del Golfo de México, en el Bajío y en las costas del Pacífico norte (Sonora, Sinaloa y Nayarit). El matorral xerófilo no leñoso es el ecosistema natural más extenso y el que se encuentra en mejor condición. El matorral xerófilo leñoso ocupa el cuarto lugar en extensión y posee una buena integridad. Por el contrario, la agricultura anual tiene la mayor extensión dentro de los usos del suelo y su integridad es muy reducida. Los asentamientos humanos representan el uso del suelo con la integridad ecosistémica más baja, aunque es posible que en algunos lugares esta pueda ser buena (por ejemplo, en ciudades con grandes extensiones de bosques urbanos). A una escala nacional, México conserva 65 % de su capital terrestre original (considerando hipotéticamente no intervención humana), siendo el matorral xerófilo no leñoso, el matorral xerófilo leñoso y el bosque de coníferas los ecosistemas que mayor capital natural mantienen (87, 85 y 83 %, respectivamente). La selva caducifolia, el bosque de encino, la selva perennifolia, la selva subcaducifolia, el bosque mesófilo de montaña y la vegetación hidrófila leñosa y no leñosa poseen un buen IIE, aunque en una extensión reducida. Los usos de suelo que mayor capital natural conservan son el bosque cultivado (55 %), el acuícola (51 %) y el agrícola perenne (41 %).

La información y los resultados obtenidos de la cuenta de condición de los ecosistemas constituyen, por un lado, la base para el diseño de estrategias de manejo de los ecosistemas naturales (conservación, aprovechamiento y restauración), artificializados y semiartificializados de acuerdo con los principios ecológicos y, por el otro, un punto de partida para evaluar la capacidad de los ecosistemas de producir bienes y servicios ambientales tanto en cantidad como en calidad para la sociedad en su conjunto.

5.6 Conclusiones

5.6.1 Relevancia de la cuenta de condición para la toma de decisiones

La contabilidad de la condición de los ecosistemas ofrece un nuevo marco de referencia para conducir el desarrollo del país. A través de esta, la toma de decisiones podría considerar no solo los beneficios económicos y sociales, así como la provisión de servicios ecosistémicos que proporcionan los activos de los ecosistemas, sino también la capacidad que estos tienen para mantenerse en funcionamiento. Al ser una aproximación del capital natural que tiene el país, la cuenta de condición, a través del Índice de Capital Natural, puede orientar la gestión del desarrollo considerando el costo que este puede tener en el patrimonio natural. Por otro lado, la evaluación de alta resolución que se ha llevado a cabo (celdas de 250 x 250 m) y la configuración tabular que se propuso permiten la agregación de los valores de condición en distintas unidades administrativas (nación, estado, municipio, etc.); naturales (tipos de vegetación, cuencas, regiones ecológicas, biomas, ecosistemas, zonas de vida) u otros tipos de clasificación (regiones económicas y biogeográficas, áreas protegidas, UICN, etcétera). Este nivel de análisis ofrece diversas ventajas que pueden ser aprovechadas en la toma de decisiones y en instrumentos como las manifestaciones de impacto ambiental, los procesos de ordenamiento ecológico del territorio, la elaboración o la actualización de los planes de manejo de áreas naturales protegidas o la identificación de áreas para el otorgamiento de apoyos para pagos por servicios ambientales, por poner algunos ejemplos. Además, será posible asociarla a evaluaciones y compromisos globales, como las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) o los compromisos que se adquieran en el Marco Mundial de Diversidad Biológica Post 2020, abriendo la posibilidad de incorporar una visión estandarizada para evaluar la condición de los ecosistemas a diferentes niveles y desde distintos enfoques.

5.6.2 Áreas de oportunidad y limitaciones

Durante el proceso de análisis para la elaboración de la cuenta piloto de ecosistemas, se identificaron algunas áreas de oportunidad para la mejora de la medición de la condición de ecosistemas:

- En este ejercicio se utilizaron, principalmente, variables funcionales y estructurales de vegetación, pero se recomienda enriquecer el Índice de Integridad Ecosistémica con nuevas variables. En particular, sería oportuno incluir aquellas que evalúen las características físicas, faunísticas y otras que estimen la condición a nivel paisaje. Sería importante analizar la posibilidad de integrar la información de las cartas de vegetación primaria y secundaria al Índice o utilizarla como parte de un proceso de validación.
- Se recomienda añadir en la capa de impulsores (presión) las variables que constituyen el Índice de Huella Humana y otros impulsores que tengan efectos en la integridad ecosistémica, continuando con una estructura que represente de manera causal la relación entre factores de presión y variables de estado.
- La elección de las variables para el cálculo de la integridad de los ecosistemas deberá realizarse con base en una evaluación crítica sobre su aportación para la evaluación de la condición y su alineación con los criterios establecidos por la SEEA EA. Se recomienda poner especial atención en asegurar la continuidad en la generación de datos, cubriendo el territorio nacional y la temporalidad con la que se desee obtener la cuenta de condición de los ecosistemas. Por lo tanto, en la elección de variables se deberá incluir la participación de las instituciones encargadas de su obtención (como CONABIO, CONAFOR, INECOL e INEGI), buscando garantizar la recopilación periódica de datos en una escala nacional, con características estandarizadas. Finalmente, se recomienda aprovechar las ventajas que ofrecen distintos algoritmos para sugerir relaciones entre variables. El conocimiento de la relación entre varias variables para conformar índices de agregación constituye un tema de interés para el SEEA EA que aún se encuentra en discusión. Los resultados obtenidos permiten ver que una aproximación basada en herramientas, como la utilizada en este estudio piloto, puede ser de utilidad.
- Se recomienda continuar con la medición de la condición de los ecosistemas comenzando con: a) organización de un curso para poder transferir el conocimiento y los detalles sobre la metodología utilizada, b) integración de una base de datos geoespacial con toda la información económica y biofísica utilizada para el proyecto y c) desarrollo de flujos de trabajo inter e intrainstitucional para el análisis de la información que incluya la organización de un taller o grupo de trabajo con el fin de explorar con otras instituciones el uso de nuevas variables que puedan utilizarse para el cálculo del Índice de Integridad Ecosistémica.

Para poder responder a estas áreas de oportunidad, es importante formar un grupo de trabajo interinstitucional que responda a los procesos de gobernanza dentro de los órganos del SNIEG, específicamente dedicado a la medición de la condición de ecosistemas y sus vínculos con los flujos de los servicios ecosistémicos. Un grupo así deberá estar posicionado para sumar el conocimiento, información y visión de los expertos en la materia de manera transversal, diseñando un mapa de ruta que plantee objetivos concretos en el corto y mediano plazo.

6 Contabilidad y valoración de los servicios de los ecosistemas

Mensajes clave

Los servicios de los ecosistemas (SE) contribuyen a generar valor en las actividades económicas y al bienestar de la sociedad. Sin embargo, es común que los SE no tengan un valor monetario específico, lo cual se traduce en su uso y explotación de forma ineficiente, por lo que su incorporación en la toma de decisiones de los agentes privados y de la política pública resulta limitada. De este modo, resulta relevante realizar la valoración monetaria de la contribución de los SE a las actividades económicas y humanas.

Existen múltiples métodos de valoración monetaria de los SE. La aplicación de estos métodos requiere realizar diversos supuestos e inferencias, por lo que estas valoraciones deben tomarse con precaución y reconocer su alto nivel de incertidumbre.

En este piloto se utilizó un enfoque centrado en los valores de intercambio de los servicios ecosistémicos y, por lo tanto, excluye otros enfoques de valoración relacionados con otros servicios y beneficios.

6.1 Introducción a los servicios de los ecosistemas

La valoración monetaria de los SE busca reconocer la contribución de estos servicios a las actividades económicas y humanas en general. Ello permite reconocer la importancia que juegan los servicios ecosistémicos en la economía y, en consecuencia, de su preservación y uso sustentable.

Para efectuar el análisis de la valoración monetaria de los servicios y activos de los ecosistemas, se requirió establecer una serie de supuestos (por ejemplo, el uso sustentable de los

recursos naturales) y de inferencias con la finalidad de analizar detalladamente la forma en la que la provisión de dichos servicios impacta en la economía. Por ello, estos resultados deben considerarse como preliminares, pues la intención es generar un mayor conocimiento de la importancia que tienen los ecosistemas en la oferta total de bienes y servicios y, en particular, para el bienestar humano. En este sentido, se debe considerar que el estudio no abarca, en una primera etapa, toda la oferta de SE, sus potenciales valores futuros y sus valores intrínsecos.

De esta manera, los resultados obtenidos permiten identificar el valor económico de algunos de los servicios y activos de los ecosistemas en referencia con sus beneficios en las actividades económicas y humanas, por lo que dejan espacio para que en etapas posteriores, de manera coordinada con las instituciones del sector ambiental, se trabaje en esquemas de valoración para el total de los ecosistemas o el valor de la naturaleza con el fin de eliminar paulatinamente los supuestos iniciales y disminuir los factores de incertidumbre que se puedan haber presentado.

En este análisis se incluyó exclusivamente la valoración monetaria de algunos de los servicios finales de los ecosistemas (por ejemplo, se excluyen los intercambios intermedios al interior de los ecosistemas) con valores de intercambio (*exchange values*) reales o imputados. En particular, se hace la propuesta piloto de valoración monetaria para:

1. Servicio de provisión para el sector agrícola y cultivos seleccionados (arroz, frijol, maíz, trigo, sorgo y soya).
2. Servicio de regulación por captura y secuestro de carbono (en biomasa y suelo).
3. Servicio de regulación por polinización en los cultivos agrícolas.
4. Servicio de provisión y regulación del abastecimiento de agua.
5. Servicios culturales en la economía del turismo de naturaleza.

El SEEA EA define los SE como las contribuciones de los ecosistemas a los beneficios utilizados en actividades económicas y humanas, y los distingue en tres grandes categorías: servicios de aprovisionamiento, regulación y culturales (UN, 2021).

El enfoque para la medición (cuantificación y valoración) se centra en los llamados servicios ecosistémicos finales, es decir, los flujos de servicios ecosistémicos entre los activos del ecosistema y las unidades económicas. El marco de la contabilidad de ecosistemas también apoya el registro de flujos de servicios ecosistémicos intermedios, que son flujos de servicios entre activos ecosistémicos, como servicios de criadero o polinización. Para efectos contables, el suministro de SE se puede atribuir a los activos individuales de los ecosistemas correspondientes (por ejemplo, el suministro de la madera es atribuible a los bosques) o, en el caso de la prestación más compleja de servicios, la contribución estimada puede ser atribuible al suministro total (por ejemplo, la captura de carbono es atribuible a los ecosistemas en total). Para cada medición de la oferta de servicios ecosistémicos, debe haber un uso correspondiente. La atribución del uso de los servicios ecosistémicos finales a diferentes unidades económicas

es un elemento fundamental de la contabilidad. Dependiendo del servicio ecosistémico, el usuario (por ejemplo, hogares, empresas o gobierno) puede recibir ese servicio mientras se encuentra haciendo uso del activo del ecosistema que ofrece el servicio (por ejemplo, cuando está capturando peces de un lago o cuando está recibiendo servicios de filtración de aire de un bosque vecino).

El suministro y el uso de los servicios ecosistémicos se registran en cuadros de oferta y utilización. El concepto básico de valoración aplicado en el SCN y utilizado también en la contabilidad de ecosistemas es el **valor de cambio**, es decir, el valor al cual se intercambian bienes, servicios, mano de obra y activos, o bien, el valor al cual estos se podrían convertir en efectivo. Los enfoques de valoración adoptados para la contabilidad de ecosistemas excluyen el excedente del consumidor que puede estar asociado con las transacciones en servicios ecosistémicos.

En la mayoría de las circunstancias, los valores de los servicios ecosistémicos no se observan porque no están físicamente representados y no se transaccionan en el mercado. Se han desarrollado una serie de técnicas para la valoración de transacciones no de mercado que pueden aplicarse con el fin de proporcionar estimaciones del valor de la oferta y el uso de los servicios ecosistémicos en términos monetarios. No obstante, cabe señalar que existe una serie de desafíos con respecto a la aplicación de esas técnicas y la interpretación de los valores que producen, razón por la cual los resultados de la valoración de los servicios ecosistémicos, tal como se reportan en este informe, deben considerarse experimentales.

6.1.1 Clasificación de servicios de los ecosistemas

A pesar de los avances en el desarrollo de clasificaciones de SE, en particular la Clasificación Común Internacional de los Servicios Ecosistémicos (CICES, por sus siglas en inglés) y el Sistema Nacional de Clasificación de Servicios de Ecosistemas (NESCO Plus, por sus siglas en inglés), aún no existe una clasificación internacionalmente acordada de estos. En ese sentido, el SEEA EA propone una lista de referencia de servicios ecosistémicos seleccionados (ver Anexo 9.5.1), los cuales, en su nivel más alto de agrupación, son:

- Servicios de aprovisionamiento. Estos servicios representan las contribuciones materiales y energéticas generadas por o en un ecosistema a las actividades económicas y humanas (UN, 2014, p. 42).
- Servicios de regulación. Incluyen, por ejemplo, la contribución de los ecosistemas a la regulación del clima, del ciclo hidrológico o de la calidad del aire (UN, 2014, p. 42). Se

debe prestar especial atención, ya que algunos de estos servicios pueden ser insumos para la generación de otros servicios ecosistémicos, lo que puede inducir doble contabilización (UN, 2014, p. 107).

- Servicios culturales. Estos se generan, normalmente, en sitios específicos con un valor recreacional, cultural, estético y para el desarrollo científico.

Figura 6-1. Diagrama sobre los servicios y activos de los ecosistemas



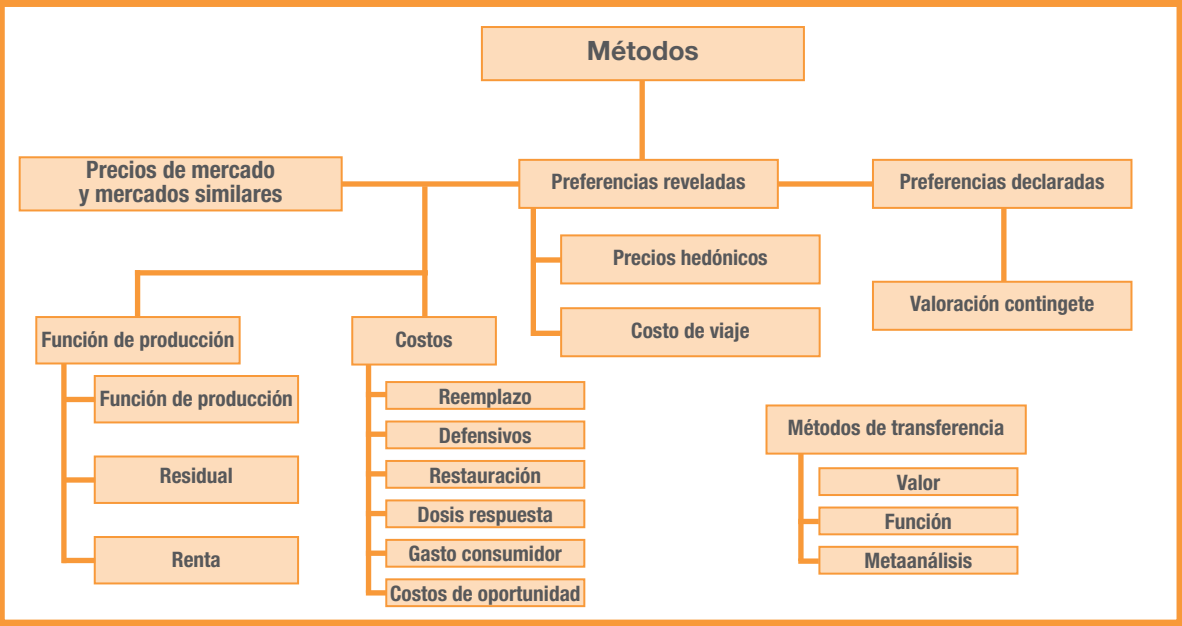
Fuente: elaboración propia con base Horlings *et al.* (2019a), p. 16.

6.1.2 Métodos de valoración monetaria de los servicios y activos de los ecosistemas

Los principales métodos de valoración de los SE se sintetizan en la figura 6-2.

Existen diversos métodos de valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas que tienen distintas ventajas y limitaciones que se sintetizan en el cuadro 6-2.

Figura 6-2. Métodos de valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas



Fuente: elaboración propia con base en *Chapter 9: Accounting for ecosystem services in monetary terms* (UN, 2012).

Cuadro 6-1. Métodos de valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas

Continúa

Método	Comentarios
Preferencias reveladas	
Función de producción	Valores físicos.
	Utilizado para productos específicos.
Precio de la renta unitaria del recurso	Valores monetarios asociados a la diferencia entre ingresos y costos (residual).
	Desafíos: estructura de mercado y derechos de propiedad.
Método de costo de uso o precio de la renta	Permite incluir especificaciones asociadas a cambio climático.
Precios hedónicos	Basado en atributos.
	Compras de bienes y elección laboral.

Cuadro 6-1. Métodos de valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas**Concluye**

Método	Comentarios
Método del costo de viaje	Bienes complementarios. Requiere identificar la contribución específica.
Método de costos de reemplazo	Bienes sustitutos. Salud, mortalidad y morbilidad. Requiere conocimiento de las funciones del ecosistema.
Métodos de costos defensivos	Comportamiento para evitar daños. Mejora las valuaciones monetarias considerando que los beneficios son mayores que los costos. Basados en la función de producción de los consumidores (funciones de dosis respuesta). Requiere que el daño refleje los SE.
Método de costos de tratamiento o restauración	Requiere definir la canasta de servicios de los ecosistemas.
Método de funciones de dosis respuesta	Requiere identificar los efectos del daño.
Método de gasto del consumidor	Necesario identificar el gasto específico. Utiliza funciones de demanda obtenidas de costo de viaje, evitar el daño o preferencias reveladas.
Método de transferencia de beneficios	
Preferencias declaradas (<i>Stated preferences</i>)	
Valoración contingente (incluye experimentos de selección)	Fundamental el diseño y la estimación de la encuesta considerando bienes sustitutos, restricción presupuestaria y retroalimentaciones entre opciones. Estima el superávit del consumidor y el bienestar. Las valoraciones inician a converger con las valoraciones de preferencias reveladas.
Valoración de activos	
Método de GVA/NVA	Utiliza horizonte a 25 años y tasas de descuento entre 2 y 3 por ciento.
Adicionales (mercado directo)	
Pagos por servicios ambientales	Utilizado normalmente para servicios de regulación como secuestro de carbono. Estos pagos corresponden, en muchos casos, a mercados con fuertes regulaciones.

Fuente: basado en Horlings et al. (2019a, pp. 27-28), Champ et. al. (2017), OCDE (2018, p. 56) y Markandya (2019 y 2020).

6.2 Provisión de los servicios de los ecosistemas a la producción agrícola y cultivos seleccionados

Mensajes clave

El estudio de valoración para cultivos agrícolas seleccionados dejó ver que la contribución de los SE a la producción agrícola y a los cultivos seleccionados es relevante, aunque requiere de análisis posteriores para explicar la volatilidad y heterogeneidad de los valores obtenidos para los diferentes cultivos. Ello tiene una especial relevancia atendiendo a que las actividades agrícolas contribuyen al PIB nacional, al empleo, a las exportaciones, al bienestar de la población rural, a la provisión de insumos y a la seguridad alimentaria del país.

La valoración monetaria bruta de la contribución monetaria de los SE a la producción agrícola (rendimiento) tuvo un valor de 163 667 millones de pesos corrientes en 2013 que representaron 39.23 % del valor de la producción agrícola (VPA) en el mismo año (subsector 111) y 1.01 % del PIB de 2013 y un valor promedio anual, para el periodo 1993-2018, de 37.78 % del VPA y de 0.99 % del PIB nacional. Por su parte, la estimación del rendimiento neto de los SE en el sector agrícola (incorporando degradación de suelos) indica una contribución de 110 723 millones de pesos corrientes en 2013 que representaron 26.54 % del VPA y 0.68 % del PIB de 2013 y una contribución promedio anual entre 1993-2018 que correspondió a 22.64 % del VPA y 0.59 % del PIB.

En principio, se determinó que el valor monetario estimado de la contribución de los cultivos seleccionados (maíz, trigo, soya, sorgo, frijol y arroz) es consistente en el tiempo de manera agregada, pero que muestra una importante heterogeneidad por producto. Ello sugiere que la contribución de los SE es heterogénea por tipo de cultivo.

La volatilidad de la valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas sugiere la presencia de factores adicionales que se deben analizar, como estructuras de mercado no competitivas, procesos de especulación de la tierra, diferencias en los procesos productivos (irrigación y temporal), diferencias socioeconómicas de los productores (por ejemplo, nivel educativo), choques en los precios de los alimentos o eventos climáticos extremos.

El valor monetario de la contribución de la canasta de servicios de los ecosistemas a la producción agrícola muestra diferencias regionales importantes. Por ejemplo, maíz y frijol se distribuyen en todo el país, mientras que otros cultivos tienden a concentrarse en el norte y centro del país.

Las estimaciones de los SE con microdatos muestran que existen formas de uso y apropiación de los SE diferenciadas por tipo de productor y de cultivo. En este sentido, la pérdida de los SE tiene consecuencias diferenciadas en la administración de riesgos y maximización de ingresos de los diferentes tipos de productores agrícolas.

La estimación econométrica de la ecuación (4) (basada en el modelo Neo-Ricardiano) muestra que el residual estimado del precio unitario de la renta del recurso refleja parcialmente los servicios ecosistémicos y, adicionalmente, a otros determinantes como el clima, uso de maquinaria y equipo, y factores socioeconómicos. Ello sugiere que las formas de uso y apropiación de los SE están condicionadas por las características del productor, del proceso productivo y del tipo de producto. Esto resulta relevante para construir políticas públicas diferenciadas por grupos socioeconómicos, tipos de productores agrícolas y regiones.

6.2.1 Introducción

Las actividades agrícolas son fundamentales para la dinámica económica, la generación de empleos e ingresos de la población rural, en la balanza comercial, para el bienestar social y la seguridad alimentaria. En este sentido, la contribución de los servicios de los ecosistemas a la producción agrícola es particularmente relevante en México.

El objetivo de este capítulo es estimar el valor monetario bruto de una canasta de servicios de provisión (por ejemplo, ciclo y estructura de nutrientes y humedad del suelo, biomasa, diversidad genética, control de plagas, provisión de agua y erosión del suelo) y de regulación final (por ejemplo, polinización) de los ecosistemas a la producción agrícola total y de los cultivos agrícolas seleccionados.

6.2.2 Hechos estilizados

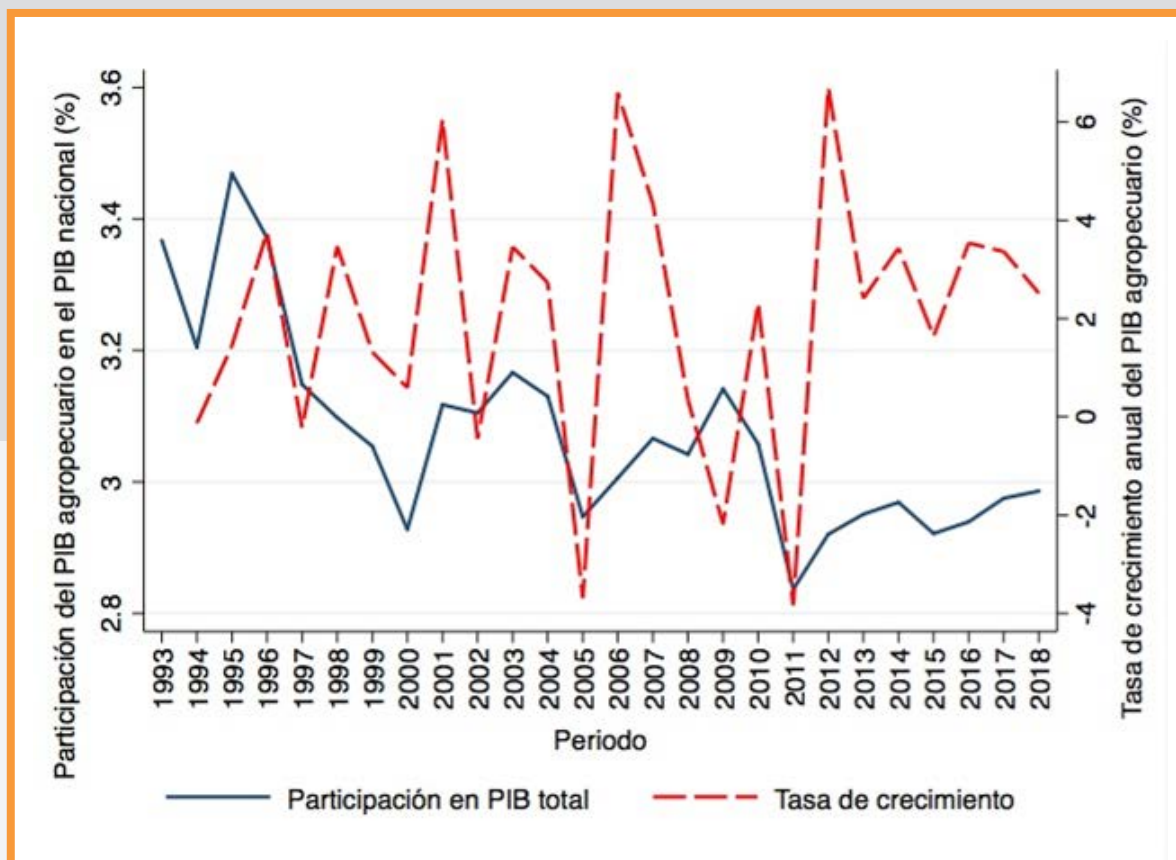
El sector agropecuario²² representó alrededor de 2.99 % del PIB en 2018, con una tasa de crecimiento promedio anual de 1.94 % entre 1993-2018 (figura 6-3). Este sector contribuye al empleo e ingreso de la población rural y, además, con insumos fundamentales a otras activi-

22 Subsectores 111 y 112 de acuerdo con el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN).

dades económicas, como la provisión de alimentos; además, representa una parte importante de las exportaciones del país y es un factor fundamental en la administración de riesgos, y es una parte muy importante del autoconsumo de los productores de bajos ingresos. La superficie agrícola en 2018 fue de 21.16 millones de hectáreas con una tasa de crecimiento promedio anual de 0.48 % durante el periodo 1993-2018, donde 6.17 millones de hectáreas correspondían a suelos irrigados y 14.99 millones de hectáreas, a suelos de temporal.²³

23 Estas cifras pueden variar por estaciones del año.

Figura 6-3. Tasa de crecimiento de la producción agrícola y participación del PIB agropecuario en el PIB total



La producción de cultivos seleccionados²⁴ (arroz, frijol, maíz, trigo, sorgo y soya) representó alrededor de 23.36 % de la producción agrícola total en 2018.

6.2.3 Datos y métodos

6.2.3.1 Fuentes de información

El análisis y las estimaciones se realizaron con base en cuatro grandes fuentes de información:

- Datos a nivel nacional con base en el Sistema de Cuentas Nacionales (SCN) del INEGI (varios años).
- Información georreferenciada con base en el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 20019 (SADER, 2019).
- Para los cultivos seleccionados, se basa en el uso de las cartas de uso de suelo y vegetación (CUSV) del INEGI para 2007, 2011 y 2014.
- Información con microdatos: Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2014 (INEGI, 2014) que contiene datos para 66 398 unidades de producción agropecuaria (granjas) para el año agrícola octubre de 2013-septiembre de 2014.

Así, las principales fuentes de información utilizadas corresponden a:

- SCN del INEGI (varios años) de donde se obtuvieron:
 - VBP_{it} : producción bruta o valor bruto de producción a precios básicos, que es la producción de mercado más la producción de uso propio más la otra producción de no mercado (INEGI, 2013).
 - CI_{it} : consumo intermedio, que es la compra de materiales y suministros menos la variación de existencias de materiales y suministros (INEGI, 2013).
 - RA_{it} : remuneración de asalariados, son los sueldos y salarios más las contribuciones sociales a pagar por los empleadores (INEGI, 2013).
 - CTN_{it} : costo del trabajo no remunerado; el trabajo familiar no remunerado representa 16.2 % del total de trabajo empleado en la producción, cálculo propio con base en

24 Véase Sánchez-Colón (2019) para los criterios de la selección de cultivos.

la información de la ENUT y de la Cuenta Satélite del Trabajo no Remunerado de los Hogares (INEGI, 2013).

- ISP_{it} : impuestos sobre la producción, que son los pagos obligatorios sin contrapartida que las unidades productoras de bienes y servicios hacen a las unidades gubernamentales (pagos por unidad o *ad valorem*) (INEGI, 2013).
- SSP_{it} : subsidios sobre la producción, que son pagos corrientes sin contrapartida que el gobierno hace a las unidades económicas en función de los niveles de su actividad productiva, de las cantidades o valores de los bienes y servicios que producen, venden o importan (pagos por unidad o *ad valorem*) (INEGI, 2013).
- EO_{it} : excedente de operación, se define como $VBP_{it} - CI_{it} - RA_{it} - TN_{it} - (ISP_{it} - SSP_{it})$ (estimación propia).
- CKF_{it} : consumo de capital fijo, que corresponde a la depreciación experimentada durante el periodo contable por el valor corriente del *stock* de activos fijos que posee y utiliza un productor como consecuencia del deterioro físico, de la obsolescencia normal o de daños accidentales normales (INEGI, 2013).
- CDG_{it} : costo de degradación, donde se utiliza el costo de degradación del suelo²⁵ (INEGI, 2013).

6.2.3.1.1 Información georreferenciada

La información de georreferenciación de las variables de producción agrícola corresponde al SIAP. Para los cultivos seleccionados, se basa en el uso de las CUSV del INEGI para 2007, 2011 y 2014 donde:

25 El concepto de costos de degradación hace referencia a los costos en los que tendría que incurrir la sociedad en su conjunto para remediar o prevenir el deterioro de la calidad de los activos del ambiente, deterioro que es producto de las diversas actividades económicas. La valoración económica de la degradación del suelo se basa en los costos de remediación requeridos para mantener la productividad de la tierra (INEGI, 2013). El SEEA EA considera el costo de degradación como una reducción del valor de un activo del ecosistema, que se atribuye al deterioro en la condición del ecosistema. Esto se calcula con base en el deterioro de la condición de un ecosistema que tendría como efecto una disminución de la oferta de servicios en términos físicos en el futuro. El método de estimación es derivar funciones de costos y daños que se relacionan con los diferentes niveles de emisiones y residuos y, por lo tanto, de degradación. La mayoría de los métodos para valorar la degradación consisten en combinar la información sobre el nivel de residuos y emisiones a eliminar con los costos por unidad de mejora. Estos costos no son lineales. A menudo, las grandes mejoras iniciales se pueden realizar a un costo por unidad mucho menor que el costo necesario para limpiar la última unidad de emisión. Es importante notar que este enfoque para medir la degradación no está alineado con el SEEA EA, por lo que representa una propuesta de país para considerar que no toda la producción agrícola se realiza de manera sustentable.

1. Se unen las CUSV para cada uno de los años con el Marco Geoestadístico Municipal 2014. Este procedimiento se realiza mediante la operación de geoprocésamiento denominada intersección en el *software ArcGIS*. Con ello se obtienen las CUSV por municipio, lo que permite identificar específicamente los tipos de uso del suelo y vegetación para cada municipio.²⁶
2. Se estima el área total de cada uso de suelo y vegetación a nivel municipal. Esto se realiza sumando el área de los polígonos del mismo uso de suelo y del mismo municipio que están reportadas en el cuadro de atributos obtenidas en el paso anterior.
3. Se estima el área proporcional de cada polígono del mismo tipo de uso de suelo y vegetación en el municipio. Para ello, se divide el área de cada polígono entre el área total obtenida en el paso anterior (paso 2). Dicha proporción se considera como el ponderador de asignación de producción y valor de la producción, por ejemplo, un factor de 0.3 indica que el polígono en cuestión representa 30 % del total de tierra agrícola en el municipio, por lo tanto, 30 % del total de producción y del valor de la producción es asignado a dicho polígono.
4. Se asigna el volumen de producción y/o el valor de la producción reportado en el SIAP para los cultivos seleccionados en sus modalidades de riego y de temporal. Estos valores se asignan solamente a aquellos polígonos de las CUSV destinados como *agricultura anual de riego* y *agricultura anual de temporal*, respectivamente. Sin embargo, los datos del SIAP pueden no coincidir con los de las CUSV. Por ejemplo, para 2014, el municipio de Mexicali, Baja California, reportó en el SIAP una producción de trigo en su modalidad temporal de 254 302.36 toneladas y de trigo en su modalidad riego, de 265 992.19 toneladas. Por otro lado, en las CUSV no se reportó en dicho municipio ningún polígono asignado al uso de suelo *de agricultura anual de temporal*, por lo tanto, en la asignación del paso anterior no se están georreferenciando las 254 302.36 toneladas de trigo en su modalidad de temporal para ese municipio.
5. En este sentido, se procede a realizar una asignación del volumen de producción y/o el valor de la producción que no se pudieron asignar en el paso anterior. Para ello, se seleccionan otros tipos de uso de suelo y vegetación dependiendo el cultivo y municipio del que se trate. Por ejemplo, en el caso del arroz, se pueden asignar dichos valores a los tipos de suelo *agricultura de humedad anual* y *agricultura de humedad anual permanente*.
6. El cuadro obtenido en el paso 5 sobre asignación del volumen de producción y/o el valor de la producción se une con el cuadro de atributos de las CUSV que se obtiene del paso 1. Ello permite georreferenciar, en una escala de valores, tanto el volumen de la producción como el valor de la producción de los cultivos seleccionados.
7. Utilizando información de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2014, se calcula el valor de renta promedio (como porcentaje del valor de la producción) para diferentes niveles de rendimiento por producto y por estado. Esta información se une con el cuadro de atributos de las CUSV utilizando la clave de entidad federativa, la clave de producto y el nivel de rendimiento como variables claves en la asociación (o *matching*) de ambas bases de datos.

²⁶ Las tablas de atributos de estas nuevas cartas se exportan a Excel para su manejo.

8. Con base en los valores medios de renta como proporción del valor de la producción, se calcula el valor de renta total para cada uno de los polígonos de la CUSV y se grafica.
9. Este método de georreferenciación se utiliza a lo largo del estudio.

6.2.3.1.2 Información con microdatos

La base de datos utilizada corresponde a la información de la ENA 2014 que contiene información para 66 398 unidades de producción agropecuaria (granjas) del año agrícola octubre de 2013 a septiembre de 2014. Dicha muestra cuenta con representatividad nacional para los 34 productos principales en México. Utilizando la ubicación de las 202 mil tierras, para las cuales existe información en la ENA 2014, es posible vincular la información de esta con bases de datos de sistemas de información geográfica (SIG), como, clima, características de suelos, proximidad a cuerpos de agua, proximidad a vegetación, proximidad a mercados, etcétera. La ENA reporta que la superficie sembrada en México en 2014 fue de 22.4 millones de hectáreas, de las cuales, 20.3 % contaba con algún sistema de riego, mientras que el restante 79.7 % dependía de los niveles de lluvia.

6.2.3.2 Método

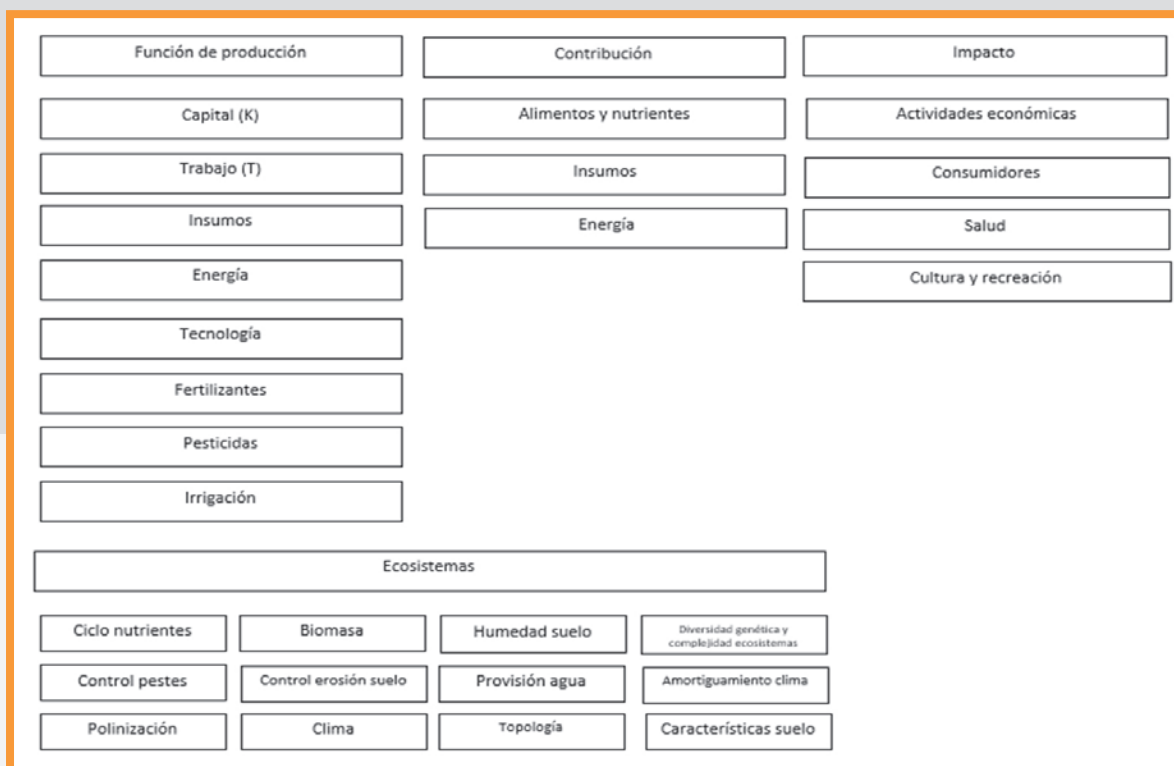
La producción agrícola es consecuencia de un proceso productivo que combina diversos factores de la producción (capital y trabajo), insumos (energía, fertilizantes, pesticidas e irrigación), algunos factores exógenos como las condiciones climáticas o del suelo con un conjunto de servicios de provisión (ciclo y estructura de nutrientes y humedad del suelo, erosión del suelo, biomasa, así como retención y provisión de agua) y servicios de regulación (polinización) de los ecosistemas (figura 6-4) (UN, 2014, pp. 46, 62; Horlings *et al.*, 2019a, p. 30).

Para la valoración monetaria, se utiliza el método del precio unitario de la renta²⁷ del recurso,²⁸ que se estima como el beneficio que se obtiene de una transacción no monetaria y que coor-

27 Las rentas se asocian, en general, a la escasez y a la presencia de estructuras monopólicas, ya que la competencia lleva a las rentas a cero (Harvey, 1994; Torvick, 2002).

28 El Sistema de Cuentas Nacionales (SNA) considera a este método como una segunda mejor opción y es ampliamente utilizada para estimar la contribución económica de algunos bienes públicos, como servicios de educación y salud (UN, 2014, p. 113).

Figura 6-4. Función de la producción y contribución de los servicios de los ecosistemas a la producción agrícola



Fuente: elaboración propia.

responde a la diferencia entre el valor total del producto²⁹ con respecto a la suma total de los costos de producción, los cuales incluyen la suma del consumo intermedio, compensación a los empleados, consumo de capital fijo (depreciación) (por ejemplo activos producidos), impuestos menos subsidios y las ganancias netas de capital (UN, 2014, p. 113) (cuadro 6-2). De este modo, la diferencia entre el precio y los costos unitarios de trabajo, activos producidos e insumos intermedios constituye el precio unitario de la renta del recurso que se considera que representa el precio estimado de los servicios de los ecosistemas (UN, 2014, p. 118). Ello en el caso en que solo existe un servicio que no se contabiliza (los SE) y el precio del resto de los insumos reflejan su contribución a la producción total.

29 Este método considera una producción conjunta, donde contribuyen múltiples insumos.

En este sentido, el método del precio unitario de la renta del recurso refleja el potencial de los servicios de los ecosistemas, como: la fertilidad del suelo, las propiedades hidrológicas (humedad del suelo) y la polinización local para contribuir a producir diversos cultivos³⁰ (UN, 2014, p. 116). Sin embargo, debe considerarse que la renta del recurso puede también reflejar otros factores, como: la estructura y el acceso a mercados, la localización, los procesos de especulación y usos alternativos del suelo (UN, 2019, p. 109) y la presencia de procesos productivos (irrigación o temporal) con distintas intensidades de insumos y tecnologías, por lo que deben considerarse las condiciones productivas específicas.

Este método tiene como supuestos (UN, 2014, p. 119):

- El ecosistema se utiliza de forma sustentable.³¹
- Los productores buscan maximizar el beneficio económico.
- Los mercados son competitivos y, por lo tanto, no existen rentas extraordinarias.

30 No se distingue entre *cultivos producidos y naturales en este estudio* (UN, 2019, p. 83).

31 Este supuesto es válido siempre y cuando no se incluya la degradación.

Cuadro 6-2. Método del precio unitario de la renta del recurso

Producto del recurso
Menos consumo intermedio (por ejemplo, fertilizantes).
Menos compensación a los empleados (RA = remuneración de asalariados).
Menos impuestos (T_x) a la producción más subsidios (S) a la producción.
Igual a excedente bruto de operación.
Menos consumo de capital fijo (depreciación).
Menos ganancias de activos producidos.
Menos ingresos laborables de personas autoempleadas.
Igual a renta del recurso.
= destrucción + retorno neto de los activos ambientales.

Nota: las formas de cálculo de los insumos intermedios, trabajo y capital fijo y tasa de ganancia pueden verse en OCDE (2009).

Fuente: Horlings et al. (2019a, p. 25).

Las estimaciones del valor monetario de la contribución de servicios de los ecosistemas en el sector agrícola por el método del precio unitario de la renta están sujetos a varios sesgos y desafíos:

- Sesgo potencial de incorrecta especificación o de exclusión de variables relevantes. La omisión de variables relevantes incluye, por ejemplo, a estructuras de mercado de competencia perfecta o monopólicas, procesos de especulación de la tierra, impactos climáticos, modificaciones en los procesos administrativos o productivos, *shocks* macroeconómicos nacionales o internacionales, áreas irrigadas, cambios de precios o de nivel de producción agrícola y otros factores no identificados.
- Riesgo potencial de atribución incorrecta de la renta o del residual. Esto es, los procesos al interior y de interacción de los SE con las actividades económicas y el bienestar humano son extremadamente complejos. Ello se refleja en que persiste una incertidumbre importante sobre la contribución específica de cada uno de estos servicios de los ecosistemas.
- Riesgo de sesgo en las inferencias debido a supuestos irreales o incorrectos como (SEEA-EEA, 2014):
 - La explotación del recurso se realiza de forma sustentable.
 - Los precios relativos son consistentes con una explotación sustentable.
 - Las actividades económicas y los precios en el resto de los mercados corresponden a mercados competitivos.
 - El sector agrícola está en equilibrio y los pagos a los insumos reflejan su contribución marginal al producto.

El marco conceptual de la estimación, con base en el precio unitario de la renta del recurso, de la contribución de una canasta de servicios de los ecosistemas en el sector agrícola se sintetiza en las ecuaciones (1), (2) y (3):³²

$$(1) \quad EO_{it} = VBP_{it} - CI_{it} - RA_{it} - CTN_{it} - (ISP_{it} - SSP_{xit})$$

$$(2) \quad R_t = EO_{it} - CKF_{it} - REN_{it}$$

$$(3) \quad RN_{it} = R_{it} - CAG_{it} \text{ o } R_{it} = RN_{it} + CDG_{it}$$

32 La tasa de rendimientos de los activos se seleccionó en 4 % anual.

donde EO_{it} es el excedente de operación en el año t y el subíndice i que representa al sector o al tipo de cultivo; VBP_{it} es el valor bruto de la producción agrícola; CI_{it} representa la suma del consumo intermedio (costos de insumos de bienes y servicios, a precio de comprador, incluidos los impuestos a los productos); RA_{it} son las remuneraciones a los trabajadores asalariados; CTN_{it} es el costo del trabajo no remunerado; $(ISP_{it} - SSP_{it})$ son los impuestos netos a la producción (impuestos $[ISP_{it}]$ (menos subsidios $[SSP_{it}]$); R_t es el valor de la renta del recurso (o residual del recurso); CKF_{it} es el consumo de capital fijo; REN_t es el rendimiento neto de los activos ambientales que se aproxima con un valor de 4 % promedio anual (ecuación 2); RN_{it} es el rendimiento neto de los activos ambientales³³ (activos ambientales ajustados por degradación)³⁴ (UN, 2014, p. 144); y CDG_t es el costo de degradación del suelo.

6.2.4 Resultados

6.2.4.1 Flujos físicos en las actividades agrícolas

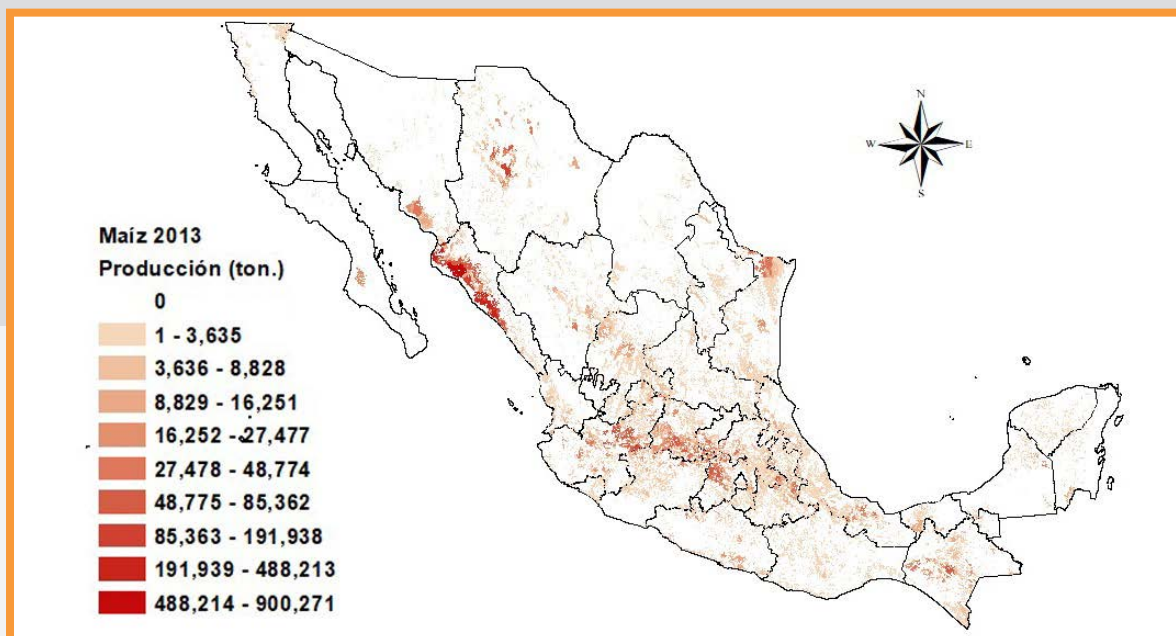
La información georreferenciada sobre la producción agrícola y los cultivos seleccionados para el análisis de los servicios de los ecosistemas se sintetiza en los mapas 6-1 al 6-6.³⁵

33 Véase para su definición como ecuación a UN (2019), p. 25.

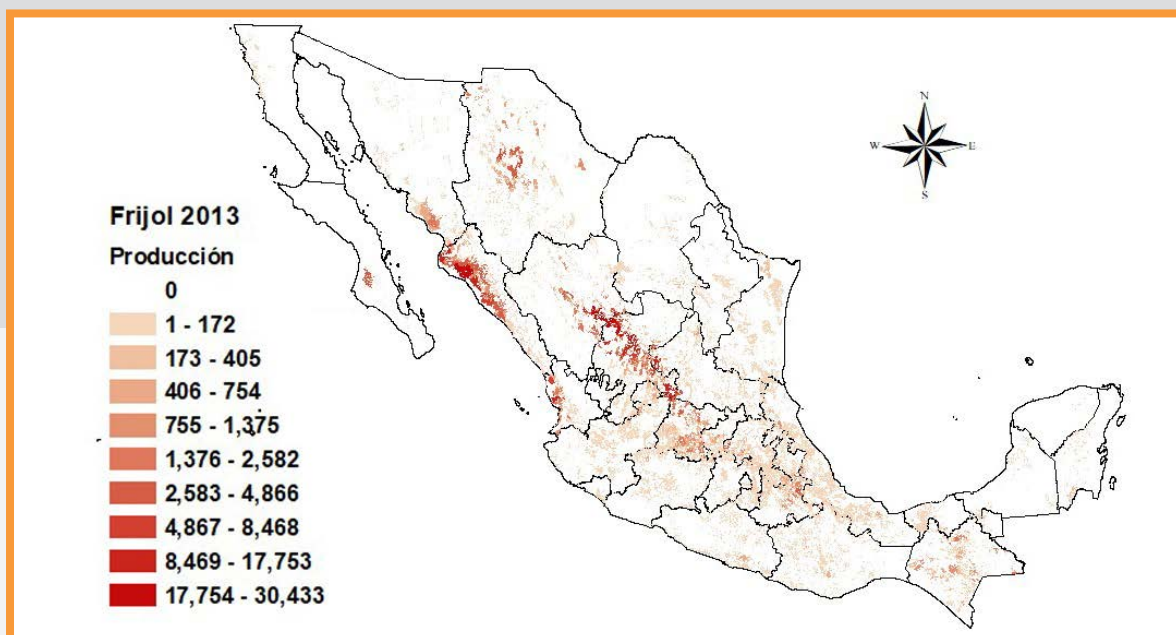
34 Estas mediciones se realizan, por ejemplo, al PIB ajustado por degradación y capital fijo, esto es, el valor neto ajustado por degradación (UN, 2014, pp. 143, 123 y 135). La inclusión del ajuste por degradación es también sugerida por Bateman *et al.*, 2011 y en UN, 2014, p. 108.

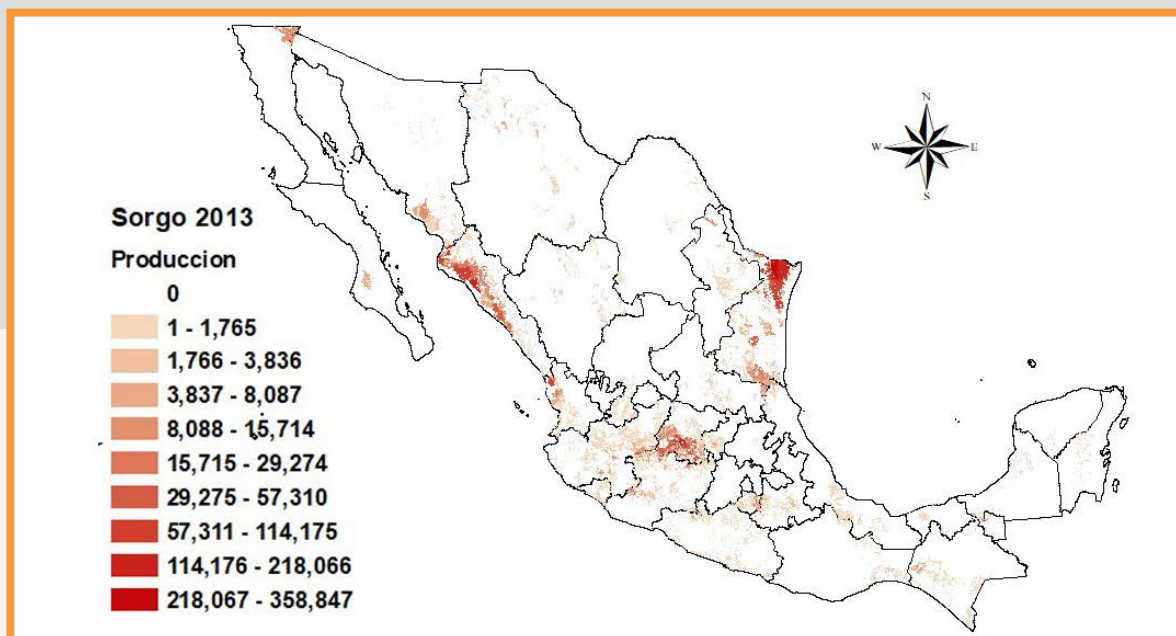
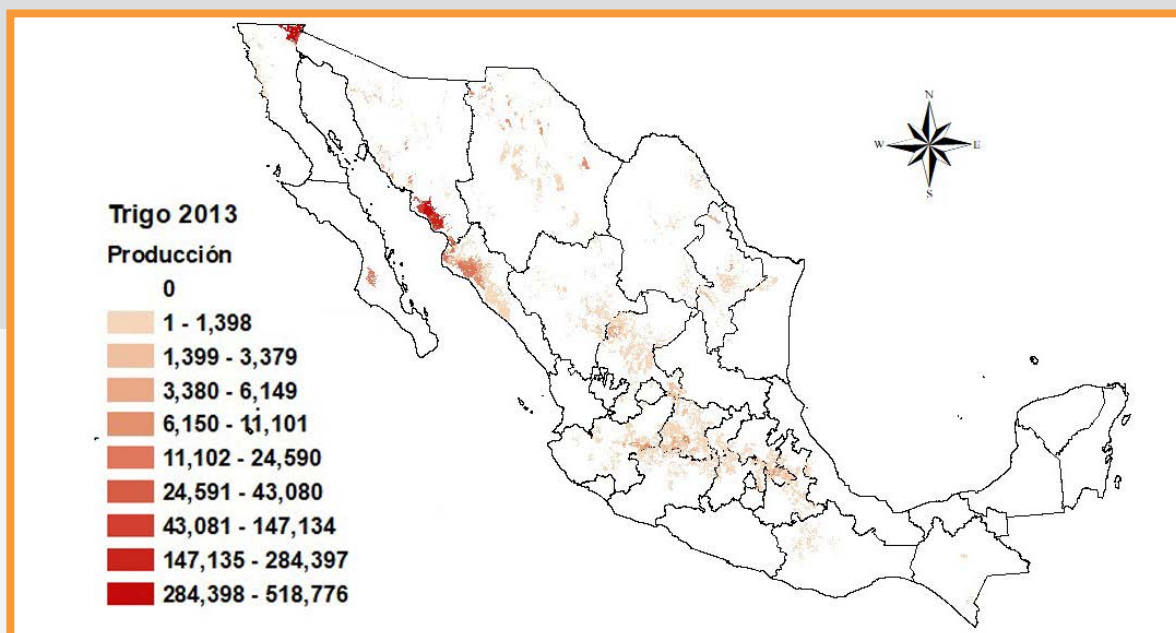
35 Para georreferenciar la producción agrícola en México, se utilizó información a nivel municipal del SIAP y la *Carta de uso de suelo y vegetación. Serie VI* que publica el INEGI. Al intersecar ambas bases de datos SIG, se obtuvieron todos aquellos polígonos de uso agrícola que se encuentran dentro de cada uno de los municipios en México. Utilizando una ponderación por proporciones de superficie, se asignó la producción correspondiente a cada uno de los polígonos con uso de suelo agrícola. Por lo que, los mapas presentados en esta sección muestran el volumen total de producción y la renta total por área agrícola.

Mapa 6-1. Producción maíz en 2013 (toneladas)

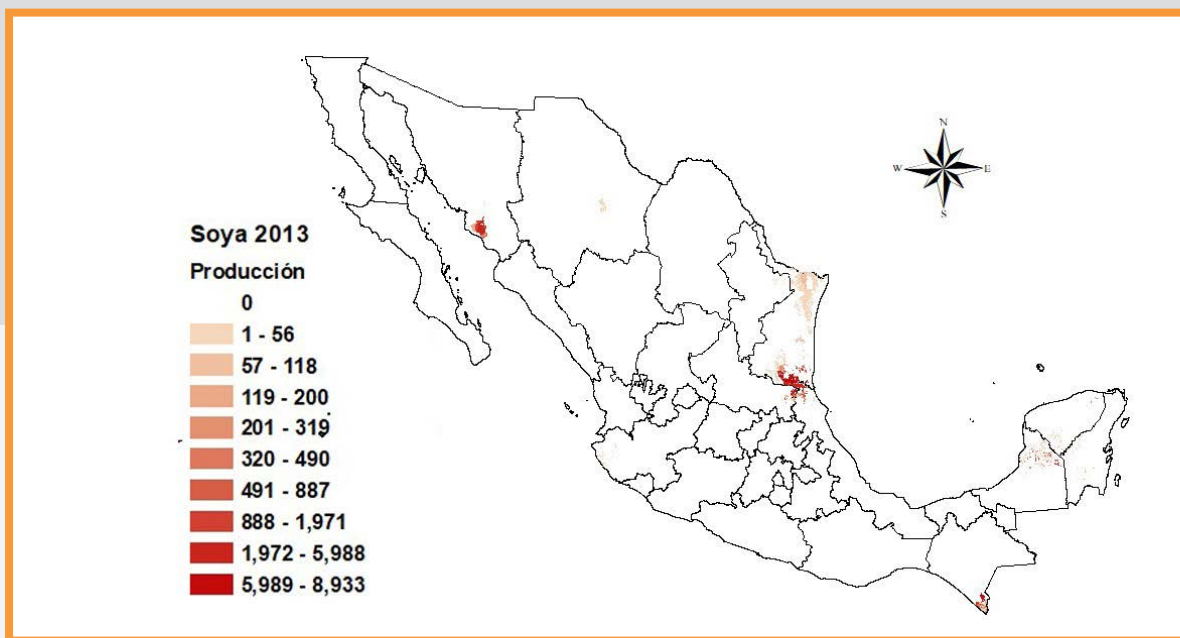


Mapa 6-2. Producción de frijol en 2013 (toneladas)



Mapa 6-3. Producción de sorgo en 2013 (toneladas)**Mapa 6-4. Producción de trigo en 2013 (toneladas)**

Mapa 6-5. Producción de soya en 2013 (toneladas)



Mapa 6-6. Producción de arroz 2013 (toneladas)



Fuente: elaboración propia con datos del SIAP y CUSV (INEGI).

6.2.4.2 Valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas en el sector agrícola

6.2.4.2.1 Valoración monetaria a nivel nacional

La estimación del método del precio unitario de la renta del recurso, ecuación (2), indica que la contribución de la canasta³⁶ de los SE³⁷ a la producción del sector agrícola en 2013 tuvo un valor de 163 667 millones de pesos corrientes, que representó 39.23 % del valor de la producción agrícola en el mismo año (subsector 111) y 1.01 % del PIB de 2013 (cuadro 6-3, figura 6-5). Por su parte, la estimación de los SE en el sector agrícola, con base en la ecuación (3) que incluye el rendimiento neto, indica una contribución de 110 723 millones de pesos corrientes en 2013 que representó 26.54 % del valor de la producción agrícola y 0.68 % del PIB de 2013 (cuadro 6-3, figura 6-5).

36 La canasta de servicios incluye, al menos, a los servicios de provisión de nutrientes y humedad del suelo, diversidad genética, control de plagas, provisión de agua y al servicio de regulación final de polinización y clima (figura 1) (UN, 2014, p. 62).

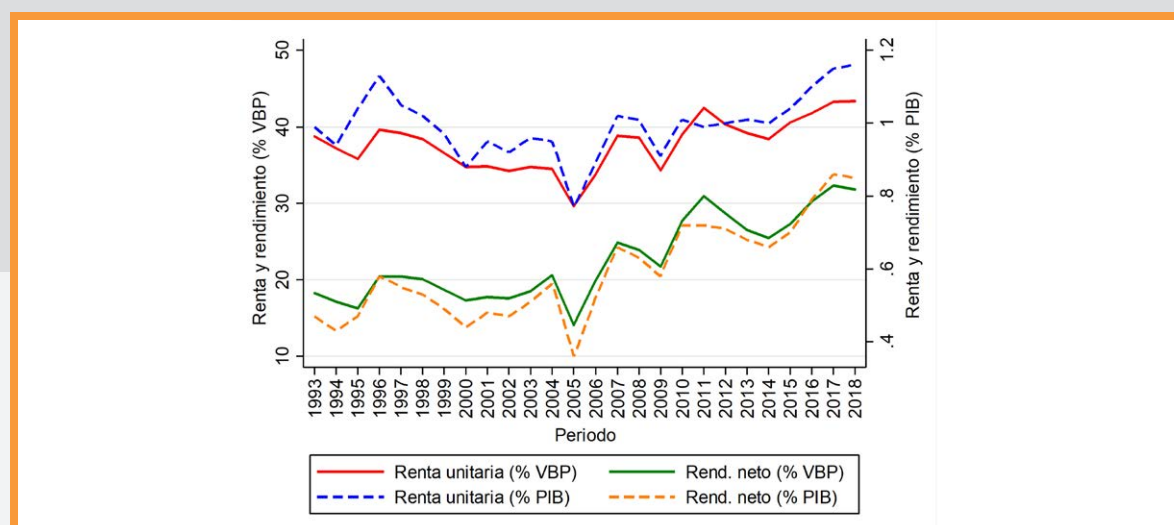
37 En la práctica, el método del precio unitario de la renta del recurso puede ofrecer resultados con un alto nivel de incertidumbre e incluso es posible que las condiciones y estructura del mercado eliminen la renta dando valores positivos muy bajos o incluso negativos (Horlings *et al.*, 2019, p. 7).

Cuadro 6-3. Contribución de los SE en el sector agrícola por el método del precio unitario de la renta del recurso

Concepto	Valor (renta unitaria)	Valor (rendimiento neto)
Valor de la contribución anual de los SE a la producción del sector agrícola y porcentaje con respecto al valor de la producción agrícola y del PIB 2013.	163 667 millones de pesos. 39.23 del valor de la producción agrícola. 1.01 del PIB.	110 723 millones de pesos. 26.54 del valor de la producción agrícola. 0.59 del PIB.
Valor promedio anual de la contribución de los SE a la producción del sector agrícola 1993-2018.	140 723 millones de pesos.	86 364 millones de pesos.
% del SE promedio anual del valor de la producción agrícola 1993-2018.	37.78	22.64
% del SE del PIB nacional 1993-2018.	0.99	0.59

Fuente: elaboración propia.

Figura 6-5. Valoración de los servicios de provisión de los ecosistemas a la producción agrícola por el método del precio unitario de la renta del recurso y la renta neta del recurso como porcentaje del valor bruto de la producción agrícola y del PIB, 1993-2018



Fuente: elaboración propia con datos del Sistema de Cuentas Nacionales de INEGI, varios años; la renta del recurso se obtuvo utilizando la ecuación (2) y una tasa media de beneficios de 4 por ciento.

6.2.4.2.2 Valoración monetaria por cultivos seleccionados

La estimación por el método del precio unitario de la renta del recurso, ecuación (2)), de la contribución de los SE en los cultivos seleccionados es heterogénea y con una volatilidad anual que se asocia a factores como: la presencia de estructuras de mercados no competitivos, procesos especulativos de la tierra, distintos procesos productivos (irrigación o temporal) y otros factores (climáticos) (cuadro 6-4 y figura 6-6).

Cuadro 6-4. Contribución de los servicios de los ecosistemas a la producción agrícola y a los cultivos seleccionados

Contribución del servicio del ecosistema a la producción agrícola (promedio anual 1993-2018)	Valor en 1993-2018 (renta)	Valor en 2013 (renta)	Valor en 1993-2018 (rendimiento neto)	Valor en 2013 (rendimiento neto)
Porcentaje del SE promedio anual del valor de la producción agrícola 1993-2018.	37.78 (0.99 del PIB) 140 723 millones de pesos de 2013	39.23 (1.01 del PIB) 163 667 millones de pesos de 2013	22.64 (0.59 del PIB) 86 364 millones de pesos de 2013	26.54 (0.68 del PIB) 110 724 millones de pesos de 2013
Arroz	41.00 %	38.25 %	25.87 %	25.56 %
Maíz	30.55 %	35.05 %	15.41 %	22.36 %
Trigo	35.10 %	46.65 %	19.96 %	33.96 %
Sorgo	30.78 %	38.25 %	15.64 %	25.56 %
Soya	27.54 %	36.94 %	12.41 %	24.25 %
Frijol	38.51 %	39.86 %	23.38 %	27.17 %

Fuente: elaboración propia; el valor de la renta se obtuvo utilizando la ecuación (1) y una tasa media de beneficios de 4 % y el valor de rendimiento neto se obtiene con base en la ecuación (3) y una tasa media de beneficios de 4 por ciento.

Figura 6-6. Valor de los servicios del ecosistema por cultivos (arroz, frijol, maíz, trigo, sorgo y soya) por el método del precio unitario de la renta del recurso, 1993-2018



Fuente: elaboración propia con datos del Sistema de Cuentas Nacionales de México, INEGI, varios años; la renta del recurso se obtuvo utilizando la ecuación (1) y una tasa media de beneficios de 4 por ciento.

La valoración monetaria de los SE en el sector agrícola fue en promedio de 6 500 pesos por hectárea³⁸ (cuadro 65).

38 El promedio para los seis cultivos seleccionados es de 3 552.83 pesos.

Cuadro 6-5. Valor monetario de los servicios de los ecosistemas en la agricultura por hectárea

Concepto	Valor (pesos por hectárea 2013 = 100)	
	Renta	Rendimiento neto
Contribución promedio de los SE	6 500	3 982
Maíz	2 546	1 385
Frijol	2 251	1 412
Sorgo	2 585	1 426
Trigo	5 072	3 194
Soya	1 887	907
Arroz	6 976	4 491

Fuente: elaboración propia; la contribución promedio corresponde al valor promedio de toda la agricultura y no representa, por lo tanto, el promedio de los seis cultivos seleccionados en el cuadro.

6.2.4.2.3 Servicios de los ecosistemas en el sector agrícola nacional: volatilidad y prospectiva

La contribución de los SE a la producción agrícola y a los productos agrícolas seleccionados con modelos Autorregresivos y de Promedios Móviles (ARIMA) permite generar un escenario prospectivo inercial (por ejemplo, Business As Usual –BAU–) con sus respectivas gráficas de abanico (*Fan charts*) (figura 6-7).

Figura 6-7. Escenarios simulados a 2025 de la contribución de los servicios de los ecosistemas en la producción agrícola por el método de la renta unitaria del recurso

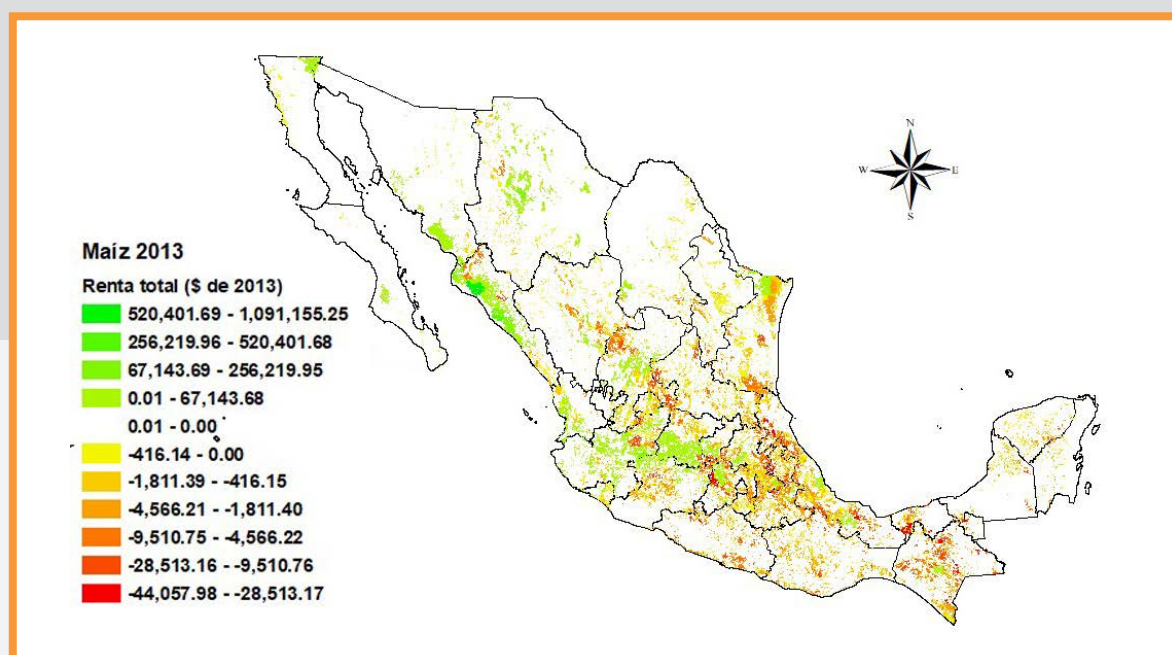


Nota: en la gráfica se muestra la proporción de renta respecto al valor de la producción, total agrícola; la renta del recurso se obtuvo utilizando la ecuación (1) y una tasa media de beneficios de 4 por ciento.

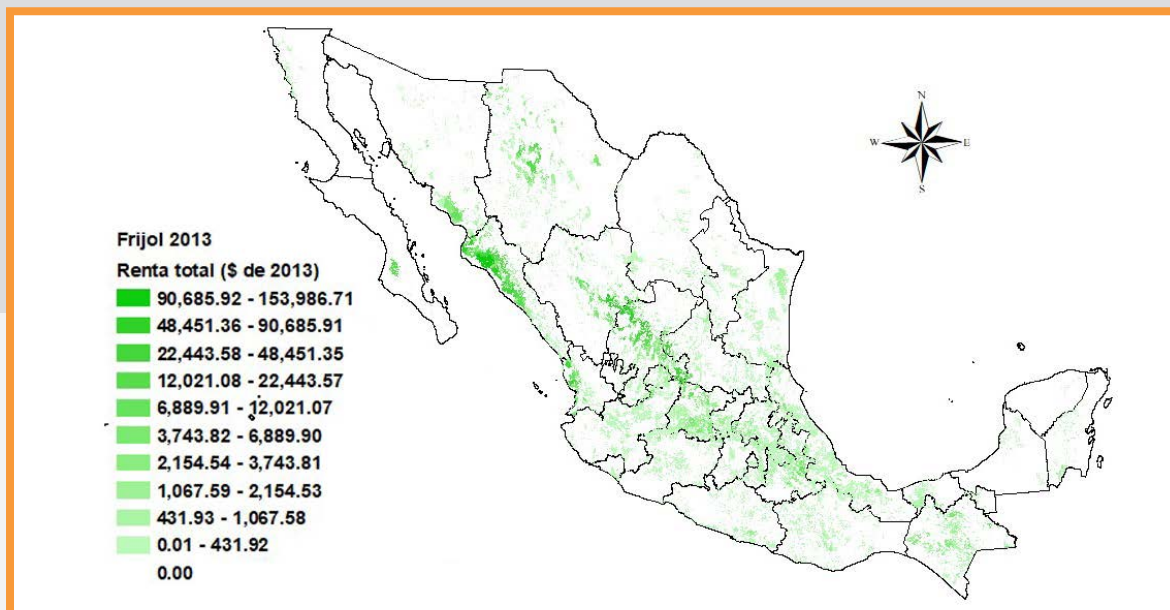
Fuente: elaboración propia con datos del Sistema de Cuentas Nacionales del INEGI, varios años; valoración monetaria de los servicios a los ecosistemas: una visión georreferenciada.

El valor total de los servicios de los ecosistemas visto de manera georreferenciada permite observar que la producción agrícola de los productos como maíz (mapa 6-7), frijol (mapa 6-8) y trigo (mapa 6-10) se cultivan en todo el territorio nacional, en tanto que el arroz (mapa 6-12) y la soya (mapa 6-11) se cultivan en regiones específicas. Por su parte, la renta estimada del recurso varía por regiones geográficas del país, mostrando que los mayores niveles de renta se concentran en el norte (oeste y este) y el centro de México. Resalta el hecho de que el nivel de renta tiende a ser superior en aquellas tierras agrícolas que cuentan con sistema de riego.

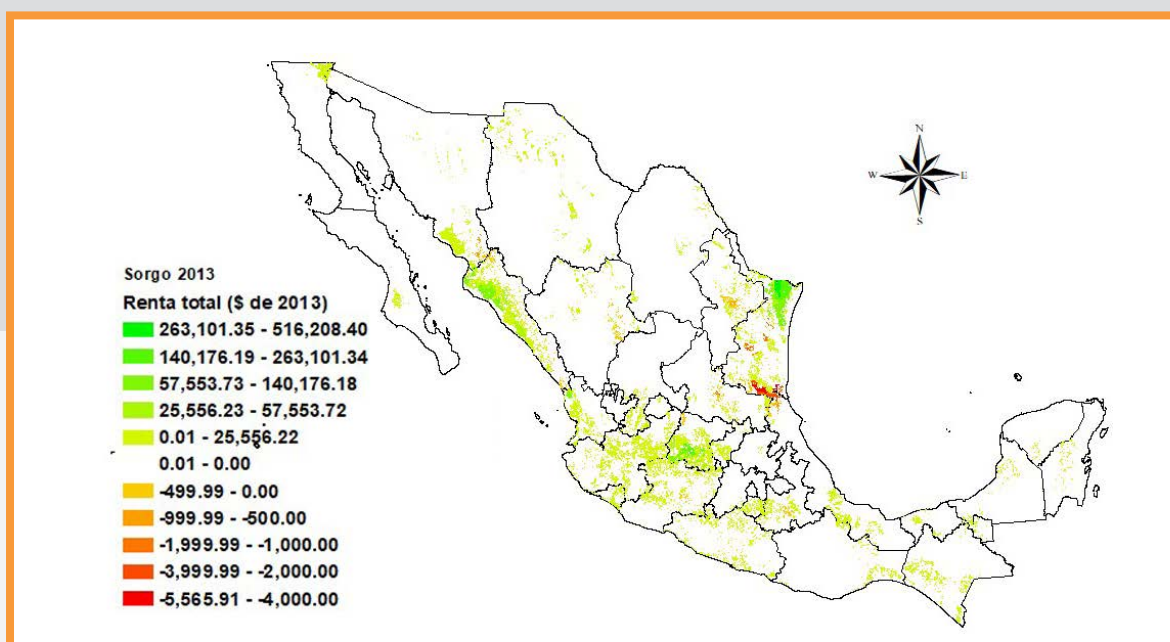
Mapa 6-7. Valor total de la renta del maíz 2013 (miles de pesos)



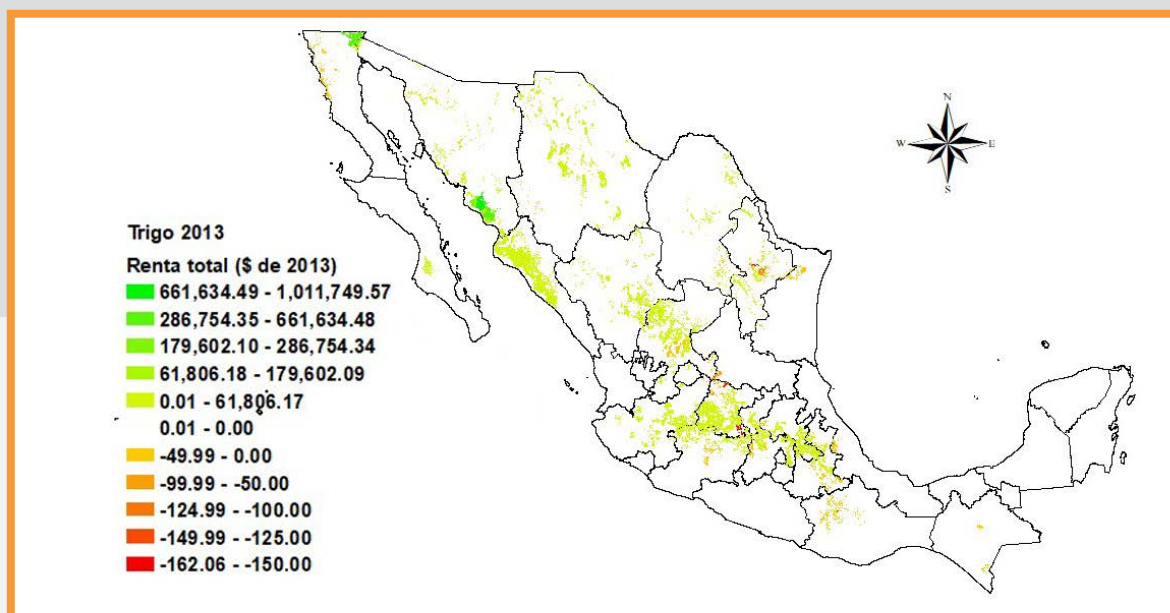
Mapa 6-8. Valor total de la renta del frijol 2013 (miles de pesos)



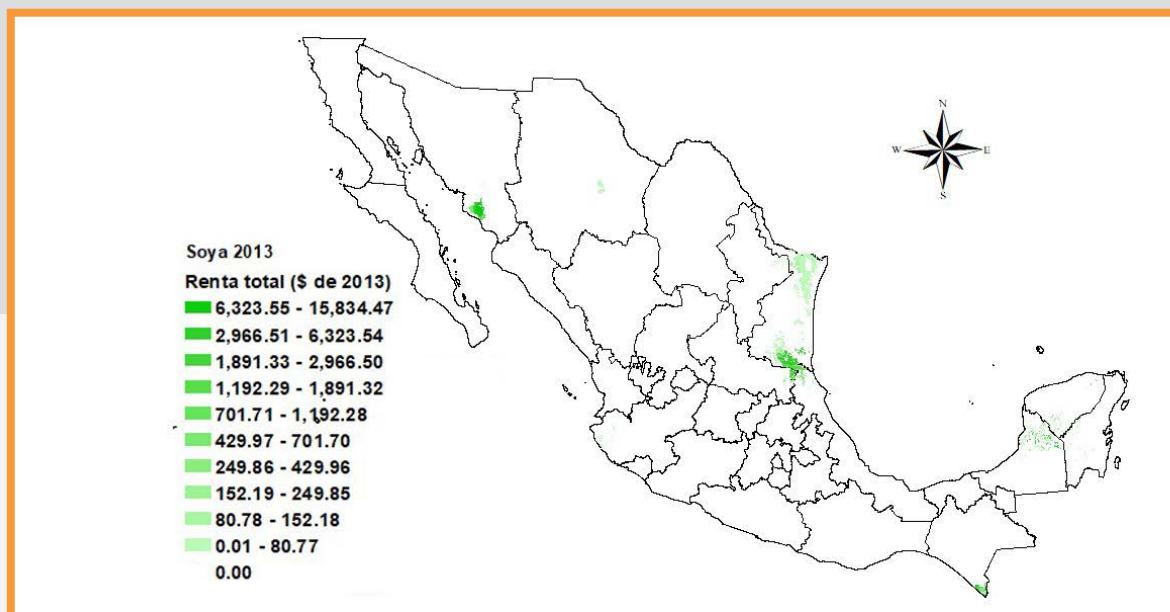
Mapa 6-9. Valor total de la renta del sorgo 2013 (miles de pesos)



Mapa 6-10. Valor total de la renta del trigo 2013 (miles de pesos)



Mapa 6-11. Valor total de la renta de la soya 2013 (miles de pesos)



Mapa 6-12. Valor total de la renta de la arroz 2013 (miles de pesos)



Fuente: elaboración propia con datos del SIAP, mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI) y de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014.

6.2.4.2.4 Contribución de los servicios de los ecosistemas en el sector agrícola: una visión con microdatos

La contribución de los SE a la producción agrícola y a los cultivos seleccionados, con base en los microdatos de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014 y utilizando la ecuación (2) muestran, por estratos de ingreso, una forma de S invertida con valores en su mayoría positivos, y donde la contribución promedio de los SE a la producción agrícola equivale a 8 840 pesos/ha en 2013, con diferencias entre áreas irrigadas y de temporal (figura 6-8, cuadro 6-6).³⁹ El comportamiento diferenciado de los productores agrícolas con respecto al uso y apropiación

³⁹ Este valor es consistente con las estimaciones agregadas.

del residual de la renta del recurso del sector agrícola y de los productos seleccionados se refleja en que el residual de la renta es mayor en cultivos irrigados que de temporal (figuras 6-8 a 6-14). Las contribuciones positivas y negativas de los SE muestran un comportamiento de los productores agrícolas que busca, simultáneamente, maximizar ganancias, maximizar la recepción de los subsidios y apropiarse de la recompensa del derecho a cultivar la tierra que incluye el usufructo de los SE y construir una estrategia de administración de riesgos apoyada en la contribución de los SE que es diferenciada entre los productores de altos y bajos ingresos.

Figura 6-8. Residual promedio (pesos por ha) de los servicios de los ecosistemas en el sector agrícola con microdatos (percentiles)

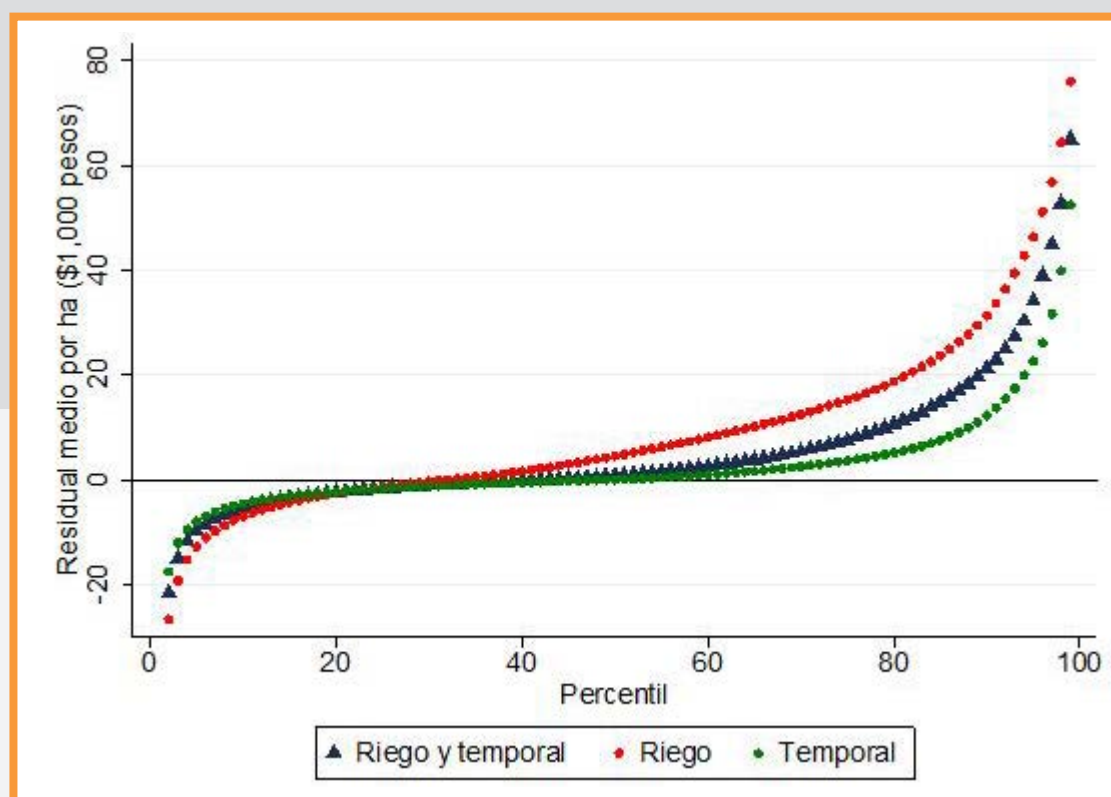


Figura 6-9. Residual promedio: maíz (pesos por ha)

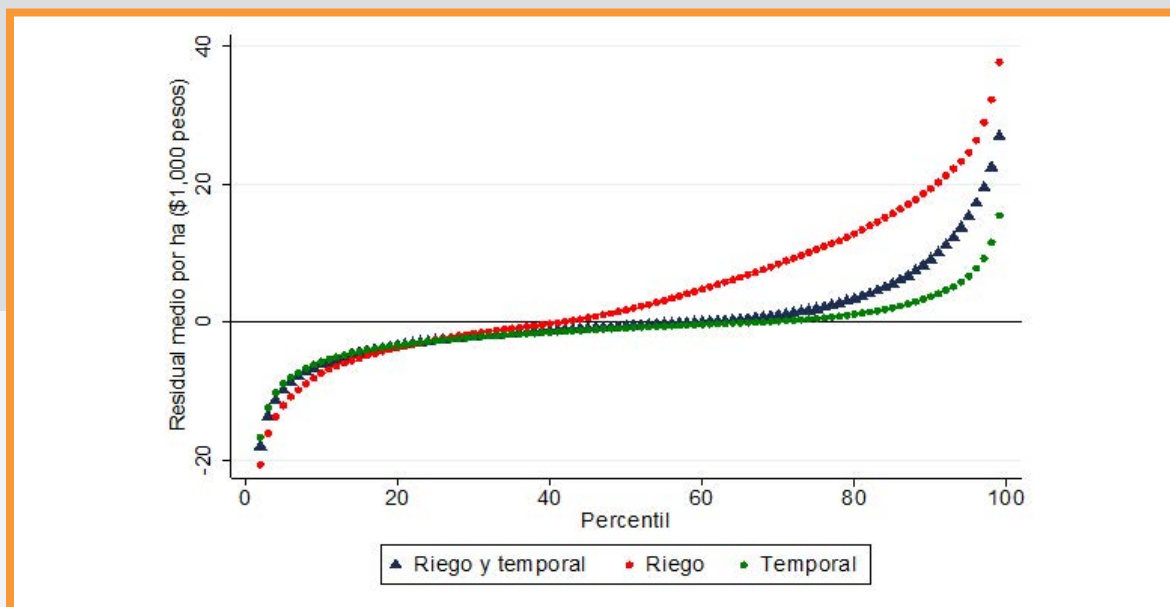


Figura 6-10. Residual promedio: frijol (pesos por ha)

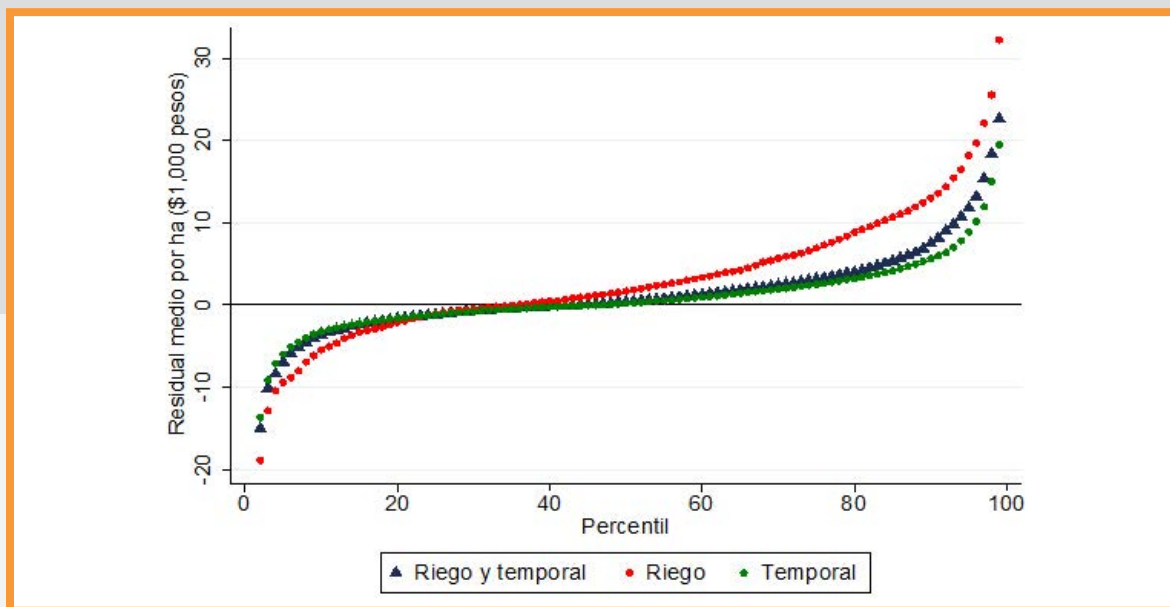


Figura 6-11. Residual promedio: sorgo (pesos por ha)

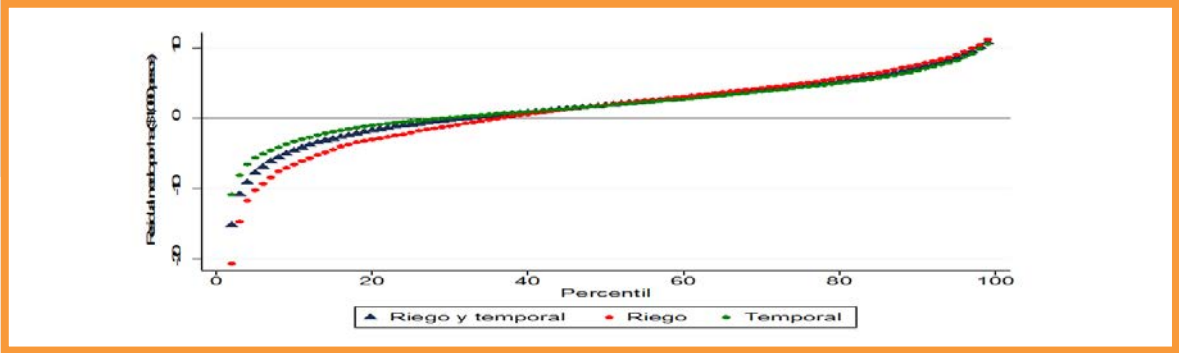


Figura 6-12. Residual promedio: trigo (pesos por ha)

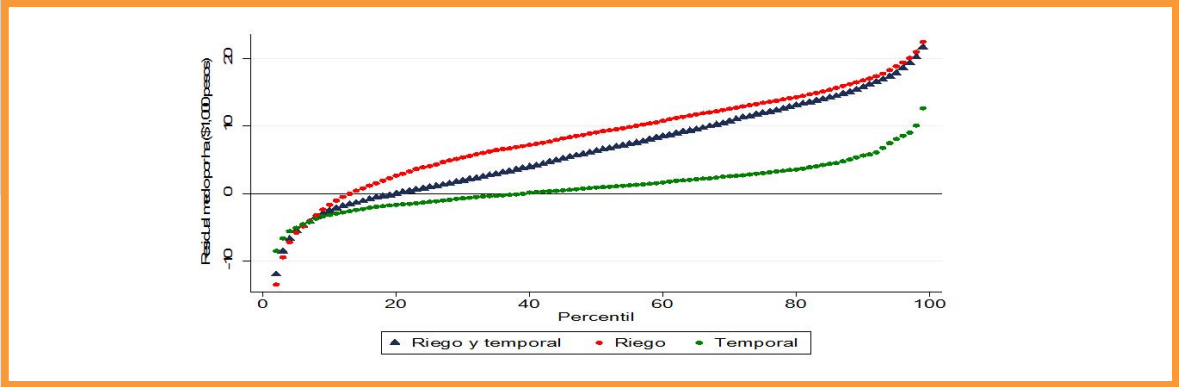


Figura 6-13. Residual promedio: soya (pesos por ha)

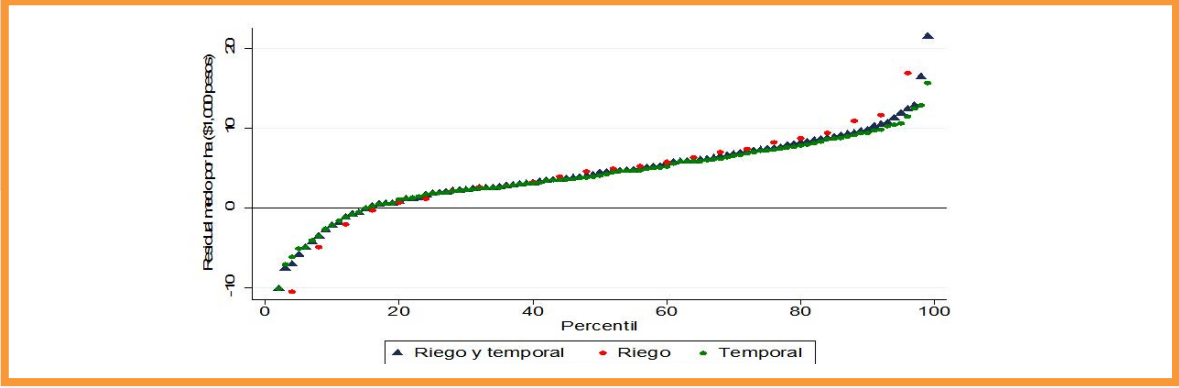
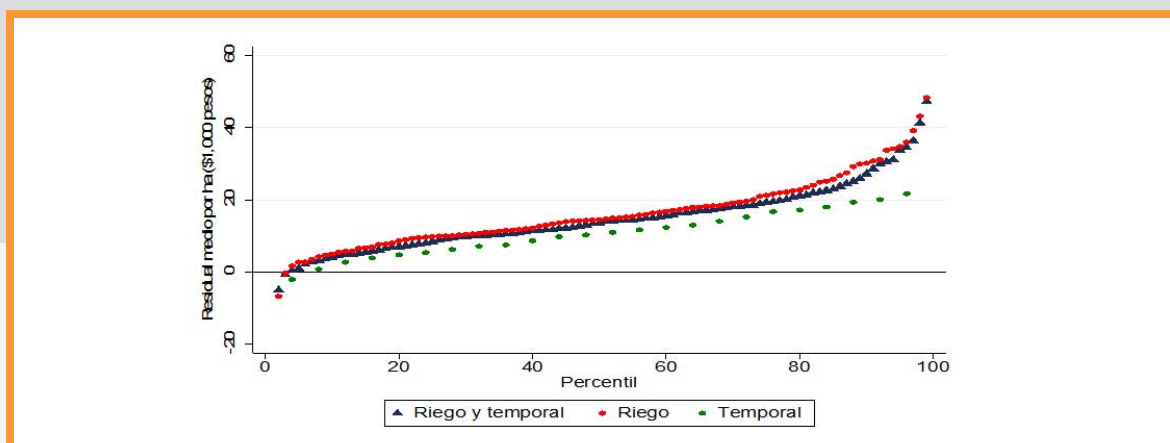


Figura 6-14. Residual promedio: arroz (pesos por ha)



Fuente: elaboración propia con datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014.

Cuadro 6-6. Valoración monetaria promedio de los servicios de los ecosistemas por hectárea por producto con microdatos, 2013

		Agrícola	Maíz	Frijol	Sorgo	Trigo	Soya	Arroz
Riego y temporal		8 840	6 569	8 648	4 436	5 236	3 088	12 633
Riego		12 487	10 248	9 321	7 101	4 857	3 745	11 775
Temporal		4 055	1 621	2 419	3 040	5 500	2 789	16 179

Fuente: elaborado con la ecuación (1) basado en la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014.

6.2.4.2.5 Identificación del residual del método del precio unitario de la renta del recurso con microdatos

La estimación con un modelo Neo-Ricardiano⁴⁰ de la contribución e identificación de los SE en el sector agrícola por el método del precio unitario de la renta indica que los servicios ecosistémicos de nutrientes,⁴¹ humedad del suelo y polinización tienen una contribución positiva en la evolución del residual, y que el clima y algunas de las variables de control (como la edad, los años de educación⁴² o programas como PROCAMPO) inciden en la evolución del residual (cuadro 6-7).

40 Los modelos Ricardianos, estimados con datos panel o de sección cruzada, buscan asociar a los diferenciales en la renta de la tierra con factores climáticos y otros factores (Mendelshon *et al.*, 1994) y en este caso incluimos las variables de los servicios de los ecosistemas, por lo que se le renombra como modelo Neo-Ricardiano.

41 Nutrientes del suelo pueden ser un indicador agregado incompleto, ya que no incorpora la diversidad de los tipos de suelos, por lo que se sugiere utilizar comparaciones con condiciones de referencia (UN, 2014, p. 65).

42 Ello sugiere la relevancia de factores como las prácticas administrativas en la producción y productividad agrícola (UN, 2014, p. 63).

Cuadro 6-7. Modelo tipo Neo-Ricardiano del residual por el método de la renta unitaria del recurso**Continúa**

		Residual (en pesos)						
Variables	Agrícola	Maiz	Frijol	Sorgo	Trigo	Soya	Arroz	
Temperatura primavera-verano (°C)	7 101.38*** (695.63)	7 644.52*** (696.17)	-1 017.50 (2 190.77)	7 044.98*** (1 547.77)	5 653.18 (3 713.16)	168 456.14 (1 073 278.55)	2 130.09 (44 951.48)	
Temperatura primavera-verano² (°C)	-154.55*** (13.73)	-155.15*** (13.61)	39.76 (44.37)	-135.64*** (29.41)	-82.74 (64.39)	-3 572.03 (20 387.92)	-468.35 (869.76)	
Temperatura otoño-invierno (°C)	-3 782.26*** (497.73)	-4 832.95*** (653.99)	-233.59 (1 170.30)	-3 883.99*** (1 185.38)	-8 253.90*** (2 254.70)	-88 405.36 (507 632.93)	23 077.56 (39 430.56)	
Temperatura otoño-invierno² (°C)	132.73*** (13.71)	113.43*** (15.24)	-3.50 (30.99)	92.35*** (28.50)	197.48*** (63.68)	2 996.41 (12 737.37)	-160.20 (932.77)	
Precipitación primavera-verano (mm)	129.63* (77.61)	67.66 (84.33)	-332.87 (268.58)	461.24** (186.93)	-54.57 (810.36)	-6 759.76 (9 422.18)	260.88 (2 252.02)	
Precipitación primavera-verano² (mm)	-0.41*** (0.15)	0.38** (0.17)	0.25 (0.34)	-0.81** (0.40)	1.09 (3.07)	2.29 (20.92)	-2.98 (2.89)	
Precipitación otoño-invierno (mm)	205.54** (99.46)	-208.21** (87.12)	420.06 (288.17)	-108.31 (208.34)	-233.31 (1 047.04)	20 075.83 (22 166.76)	-3 728.88 (4 579.94)	
Precipitación otoño-invierno² (mm)	1.93*** (0.33)	-0.08 (0.18)	-0.42 (0.67)	-1.77*** (0.59)	-1.49 (9.13)	-37.20 (175.72)	10.77** (4.30)	
Temperatura* precipitación primavera-verano	-2.00 (3.16)	-4.90 (3.72)	12.96 (10.80)	-15.07** (6.98)	0.28 (28.17)	221.12 (324.80)	62.09 (100.31)	
Temperatura* precipitación otoño-invierno	-21.62*** (4.61)	8.12* (4.30)	-18.90 (13.73)	14.55 (10.17)	-0.77 (40.98)	-712.45 (752.87)	29.04 (194.50)	
Acrisol (% del área de control)	34.43 (30.70)	22.90 (22.60)	5.89 (30.89)	90.70** (43.88)	-595.86 (384.32)		156.05 (98.58)	
Andosol (% del área de control)	131.51*** (22.07)	-16.03 (11.24)	-16.47 (30.11)	-9.05 (145.55)	132.69* (77.65)		966.55 (791.43)	

Cuadro 6-7. Modelo tipo Neo-Ricardiano del residual por el método de la renta unitaria del recurso

Continúa

Residual (en pesos)							
Variables	Agrícola	Maíz	Frijol	Sorgo	Trigo	Soya	Arroz
Arenosol (% del área de control)	-69.95 (58.63)	-93.28* (50.01)	-53.60 (132.18)	-91.54 (67.36)			-607 486.57 (617 207.61)
Cambisol (% del área de control)	-19.36** (8.84)	-9.71 (8.99)	14.90 (22.18)	55.91*** (16.31)	-37.08** (18.86)		-480.73*** (159.21)
Castañozem (% del área de control)	24.46*** (9.29)	15.60 (14.64)	6.56 (21.19)	12.38 (9.55)	-8.64 (22.34)		1 125.80 (758.95)
Chernozem (% del área de control)	112.27 (112.90)	60.07 (111.63)	-180.50** (86.25)	76.63*** (26.59)	-460.08* (249.28)		
Feozem (% del área de control)	19.35** (7.87)	-12.21 (11.77)	-5.25 (19.41)	-33.23*** (8.69)	-20.70 (18.83)	410.22 (856.05)	8.67 (135.79)
Fluvisol (% del área de control)	336.69*** (78.66)	-21.63 (38.57)	-222.42** (112.61)	-116.07* (70.32)	-209.78 (176.25)		1 233.94 (801.98)
Gleysol (% del área de control)	-2.56 (20.68)	-38.68* (22.96)	174.73* (102.16)	7.90 (39.56)			822.93** (368.42)
Litosol (% del área de control)	-8.28 (9.50)	-4.24 (14.97)	-4.14 (24.47)	-56.30*** (13.90)	71.10 (44.10)	286.30 (520.31)	331.55 (330.63)
Luvisol (% del área de control)	4.91 (12.27)	19.73 (18.61)	42.46 (42.29)	-87.54*** (29.33)	-201.11** (102.04)		-351.93 (304.90)
Nitisol (% del área de control)	-60.06 (81.69)	-74.11** (29.90)	115.38 (152.26)	328.91*** (118.81)			1 850 502.29 (1 878 139.14)
Planosol (% del área de control)	-5.49 (9.22)	-30.67*** (10.93)	19.69 (21.58)	-86.01*** (28.56)	-15.76 (48.82)		
Ranker (% del área de control)	5 351.09*** (1 208.56)	150.87 (691.74)	2 729.72 (1 790.88)	2 149.34*** (627.51)	-515.27 (1 557.65)		

Cuadro 6-7. Modelo tipo Neo-Ricardiano del residual por el método de la renta unitaria del recurso

Continúa

		Residual (en pesos)						
Variables	Agrícola	Maíz	Frijol	Sorgo	Trigo	Soya	Arroz	
Regosol (% del área de control)	-2.12 (8.57)	-15.72 (9.77)	-3.61 (17.89)	-36.48*** (13.38)	38.21 (27.68)	-1 118.18 (2 212.09)	-265.61*** (94.64)	
Rendzina (% del área de control)	-41.57*** (9.57)	-37.61** (14.87)	-36.67 (22.81)	-16.51 (12.42)	25.09 (62.16)	1 283.79 (2 403.06)	103.73 (274.20)	
Solonchak (% del área de control)	-39.97* (23.83)	-85.28** (42.10)	-48.58 (70.32)	20.13 (26.35)	-57.92 (47.11)		-900.98*** (231.65)	
Solonetz (% del área de control)	-63.49 (59.37)	-624.45*** (148.81)	-106.34** (50.09)	-360.29 (529.53)	721.05 (878.63)			
Xerosol (% del área de control)	25.61*** (7.31)	-22.29** (10.99)	-11.10 (20.99)	29.15*** (8.24)	-20.56 (22.62)	353.45 (710.44)		
Yermosol (% del área de control)	53.82 (38.82)	297.38*** (65.25)	196.52* (103.42)	-96.61 (68.46)	26.50 (89.04)			
Años de educación	80.48*** (29.23)	149.48*** (38.20)	68.88 (51.48)	-22.83 (18.63)	7.00 (51.61)	298.98 (284.44)	343.81* (199.31)	
Edad	-45.64 (75.46)	111.87 (74.90)	-12.17 (88.43)	-6.76 (38.79)	-33.04 (108.44)	359.20 (291.24)	175.68 (480.58)	
Edad²	0.28 (0.63)	-1.02 (0.64)	0.08 (0.77)	-0.06 (0.34)	0.22 (0.98)	-3.27 (2.61)	-1.26 (4.17)	
PROCAMPO (1 = recibe PROCAMPO)	-3 369.92*** (288.68)	-459.34 (342.15)	-1 560.60* (869.42)	-186.01 (286.58)	614.52 (648.84)	98.55 (2 032.12)	86.46 (1 554.52)	
Distancia al bosque (km)	14.98** (6.25)	27.60*** (9.33)	-3.92 (18.88)	-30.75*** (7.67)	-17.25 (28.78)	-640.85 (1 600.03)	-358.63* (186.73)	
Distancia a la selva (km)	1.30	-10.05* (3.33)	-1.72 (4.17)	-4.63 (11.63)	-13.38* (33.38)	344.44 (2 403.06)	-387.21* (274.20)	

Cuadro 6-7. Modelo tipo Neo-Ricardiano del residual por el método de la renta unitaria del recurso

Continúa

Residual (en pesos)							
Variables	Agrícola	Maíz	Frijol	Sorgo	Trigo	Soya	Arroz
	(2.29)	(5.20)	(12.68)	(6.56)	(8.05)	(1 073.05)	(224.90)
Distancia a vegetación secundaria arbórea (km)	13.86**	-16.04*	18.22	13.02	-1.62	626.24*	1 356.37**
	(6.43)	(9.63)	(22.18)	(9.82)	(16.01)	(339.70)	(554.04)
Distancia a vegetación secundaria herbácea (km)	9.73***	24.08***	8.99	8.70**	-18.38*	-318.47	80.57
	(2.73)	(4.67)	(9.00)	(3.46)	(9.40)	(656.27)	(138.54)
Distancia a vegetación secundaria arbustiva (km)	194.24***	173.33***	-322.07**	54.44	-83.00	604.54	1 452.51
	(41.77)	(65.22)	(132.25)	(38.85)	(169.96)	(4 550.67)	(900.72)
Tractores (1 = tractores propios)	2 169.13***	1 540.97***	580.66	16.12	214.20	4 298.88**	1 885.13
	(397.93)	(346.08)	(581.45)	(241.96)	(552.29)	(1 945.02)	(2 400.19)
Maquinaria (1 = maquinaria propia)	875.09***	1 924.83***	709.09	626.67**	548.87	137.67	-310.09
	(318.82)	(377.79)	(537.89)	(248.08)	(444.95)	(2 969.05)	(3 426.99)
Vehículos (1 = vehículos propios)	1 708.59***	207.10	120.61	62.99	-668.70	-7 384.14	4 542.60
	(257.97)	(262.00)	(394.16)	(242.40)	(557.25)	(5 656.57)	(2 995.32)
Distancia a la ciudad más cercana (km)	-23.88	-154.33***	-93.98	-22.09	-76.26	-829.45	954.68**
	(28.59)	(28.32)	(57.99)	(21.32)	(64.30)	(2 813.20)	(378.22)
Distancia al cuerpo perenne de agua (km)	-15.47*	-37.86***	-15.01	30.79***	-36.84*	-655.34	-118.04
	(8.98)	(8.05)	(15.75)	(11.76)	(22.34)	(432.36)	(110.50)
Distancia al río perenne más cercano (km)	-21.48***	-7.20	-14.77	24.14**	24.32	-470.86	449.49***

Cuadro 6-7. Modelo tipo Neo-Ricardiano del residual por el método de la renta unitaria del recurso

Concluye

	Residual (en pesos)						
Variables	Agrícola	Maiz	Frijol	Sorgo	Trigo	Soya	Arroz
	(5.97)	(8.29)	(13.01)	(9.86)	(27.17)	(457.61)	(132.41)
Área cultivada	-3.57*** (0.44)	13.01*** (4.72)	42.08*** (14.56)	-1.98 (1.96)	-6.26* (3.55)	2.41 (9.73)	-58.92*** (21.35)
Área cultivada ²	0.00*** (0.00)	-0.01*** (0.00)	-0.10*** (0.03)	0.00* (0.00)	0.00 (0.00)	-0.01 (0.01)	0.04** (0.02)
Constante	-51 675.27*** (6 294.54)	-39 735.22*** (5 396.16)	13 435.30 (16 519.94)	-55 017.00*** (12 703.77)	15 856.61 (43 528.95)	-1 492 761.66 (9 271 681.73)	-198 713.59 (252 612.12)
Efectos fijos por cultivo	Sí	No	No	No	No	No	No
Observaciones	85 936	31 262	5 395	4 002	2 761	226	244
R ²	0.151	0.198	0.178	0.254	0.262	0.168	0.560

Errores estándar robustos en paréntesis. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$.**Fuente:** elaboración propia con datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014.

6.2.5 Discusión

6.2.5.1 Conclusiones y comentarios generales

El estudio de valoración para cultivos agrícolas seleccionados dejó ver que la contribución de estos servicios de provisión es relevante, aunque requiere de análisis posteriores para explicar la volatilidad y heterogeneidad de los valores obtenidos para los diferentes cultivos. Ello sugiere que los SE son aprovechados de manera diferenciada en los diferentes tipos de cultivos y por diferentes tipos de productores. Asimismo, el valor monetario de la contribución de la canasta de servicios de los ecosistemas a la producción agrícola muestra diferencias regionales importantes. Por ejemplo, la contribución de los SE a los cultivos de maíz y frijol se distribuye en todo el país, mientras que los otros cultivos tienden a concentrarse en el norte y centro.

La contribución de los servicios de los ecosistemas a la producción agrícola, sintetizada en el cuadro 6-8, muestra que existe una estrecha interrelación entre los SE y las características y condiciones de la producción agrícola (pequeños o grandes productores o cultivos de irrigación o temporal). Ello resulta relevante para construir políticas públicas diferenciadas por grupos socioeconómicos, tipos de productores agrícolas y regiones.

Cuadro 6-8. Valoración monetaria de la contribución de los servicios de los ecosistemas al producto agrícola y productos seleccionados como porcentaje del valor de la producción agrícola, del PIB y valor por hectárea

Continúa

	Producción agrícola		Maíz		Trigo		Frijol		Soya		Sorgo		Arroz	
Estimación agregada (promedio 1993-2018)	R	RN	R	RN	R	RN	R	RN	R	RN	R	RN	R	RN
Contribución monetaria de los SE (miles de millones de pesos), 2013	140.72	86.36	20.19	10.83	3.72	2.34	4.23	2.61	0.29	0.15	4.92	2.72	0.43	0.27

Cuadro 6-8. Valoración monetaria de la contribución de los servicios de los ecosistemas al producto agrícola y productos seleccionados como porcentaje del valor de la producción agrícola, del PIB y valor por hectárea

Concluye

	Producción agrícola		Maíz		Trigo		Frijol		Soya		Sorgo		Arroz	
Porcentaje en el valor de la producción agrícola	37.78	22.64	30.55	15.41	35.10	19.96	38.51	23.38	27.54	12.41	30.78	15.64	41.00	25.87
Valor por hectárea	6 500	3 982	2 546	1 385	5 072	3 194	2 251	1 412	1 887	907	2 585	1 426	6 976	4 491
Porcentaje en el PIB	0.994	0.594	0.141	0.072	0.026	0.015	0.031	0.018	0.002	0.001	0.035	0.019	0.003	0.002
Estimación con microdatos (ENA 2014)														
Valor por hectárea, 2013	8 840		6 569		8 648		4 436		5 236		3 088		12 633	
Irigación, 2013	12 487		10 248		9 321		7 101		4 857		3 745		11 775	
Sin irrigación, 2013	4 055		1 621		2 419		3 040		5 500		2 789		16 179	
Contribución monetaria de los SE con microdatos (miles de millones de pesos), 2013	187.06		46.38		4.64		11.04		1.35		13.23		0.27	
Porcentaje en el PIB	1.11		0.275		0.028		0.065		0.008		0.078		0.002	

R = renta unitaria y RN = renta neta.

Fuente: elaboración propia con base en las estimaciones realizadas.

6.2.5.2 Recomendaciones

- Es necesario profundizar en el análisis e identificación de los componentes del residual del método del precio unitario de la renta del recurso de los servicios ecosistémicos a la producción agrícola para implementar o desarrollar métodos que permitan su desagregación y estimación de cada uno de sus valores.
- La presencia de diferencias relevantes en las formas de uso y apropiación de los SE por tipo de productor, condiciones de producción y tipo de producto sugiere la utilidad de incorporar el valor monetario de los SE en las discusiones de política pública.
- Profundizar en los análisis de los SE con base en los microdatos para identificar mejor los comportamientos de los agentes económicos en referencia a los servicios de los ecosistemas.
- Ahondar en el análisis de una relación no lineal entre los flujos físicos y los flujos monetarios, así como en el estudio de la dependencia relativa de la valoración monetaria de los SE a diversos factores económicos, sociales y de política pública.

6.3 Servicio de regulación del almacenamiento y secuestro de carbono (en biomasa y suelo)

Mensajes clave

La valoración monetaria del servicio de regulación final de captura (secuestro) y almacenamiento de carbono es fundamental en México y para el conjunto de la política de cambio climático global.

De acuerdo con el estudio de valoración económica de los SE, se determinó que la valoración monetaria del servicio de almacenamiento y captura (secuestro) de carbono puede realizarse en un marco contable consistente derivado del concepto de activos y flujos monetarios. Para ello, se consideró al secuestro de carbono como un servicio definido para un periodo determinado y al servicio anual del almacenamiento de carbono como un *stock* que conforma un balance. Esta valoración es consistente con el diseño de las políticas públicas en cambio climático, con la contabilidad de los activos y la nueva contabilidad de los ecosistemas.

Cabe señalar que la valoración monetaria del servicio de regulación de carbono es sensible a los valores seleccionados de precio del carbono y tasa de interés, con lo que se muestra que las negociaciones en cambio climático pueden incidir en el valor monetario del servicio y que puede, incluso, contribuir posteriormente a una mejora en la condición física de los ecosistemas.

La estimación del valor monetario anual del servicio de almacenamiento y secuestro de carbono, con un precio de 25 dólares⁴³ por tonelada de CO₂ y una tasa de interés de 2 % para biomasa es de 0.309 % del PIB de 2013 y de 0.315 % del PIB de 2014, y en carbono orgánico en suelos de 1.33 y 1.35 % para los mismos años. De este modo, el valor monetario conjunto del servicio anual del almacenamiento y secuestro de carbono en biomasa y suelos es de 1.64 % del PIB de 2013 y de 1.67 % del PIB de 2014.

Asimismo, se encontró que la descomposición de la evolución del secuestro de carbono en biomasa y suelos muestra comportamientos diferenciados. Al interior del estudio de carbono en biomasa, también se observan comportamientos disociados, como los de la vegetación primaria y secundaria.

La georreferenciación del valor monetario del servicio de regulación del carbono muestra los valores más altos en el sur y occidente del país.

6.3.1 Introducción

El cambio climático, consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), tiene efectos negativos en las actividades económicas, el bienestar social, el medio ambiente y los ecosistemas. En este sentido, el cambio climático es, desde una óptica económica, una externalidad negativa global que pone en riesgo un bien público global, como el clima (IPCC, 2014; Stern, 2006). En este contexto, la vegetación y los suelos capturan (secuestro) y acumulan (almacenamiento) reservas de carbono a través de la fotosíntesis y otros procesos biológicos, que se expresa en toneladas de carbono por año por un área determinada (tC/ha/año) (Horlings *et al.*, 2019a, p. 43 y Horlings 2019b).⁴⁴ Este secuestro y almacenamiento de carbono es un servicio de regulación de los ecosistemas a las actividades económicas y humanas al reducir los impactos negativos del cambio climático. De este modo, el objetivo de este capítulo es estimar el valor monetario del servicio de regulación final de la captura (secuestro) y almacenamiento de carbono en México.

43 Dólares estadounidenses.

44 El término CO₂e (CO₂ equivalente) corresponde a 0.27 (12/44) unidades de carbono, esto es, la cantidad de CO₂ puede ser expresada en términos de carbono y el monto de carbono que contiene resulta de multiplicar el monto de CO₂ por 0.27 (12/44). Por ejemplo, 1 kg de CO₂ puede ser expresado como 0.27 kg de carbono, puesto que este es el monto de carbono en el CO₂ (1 kg de carbono equivale a [44/12] kg de CO₂).

6.3.2 Datos y métodos

6.3.2.1 Fuentes de información

La información de carbono en biomasa aérea viva corresponde a los ciclos de muestreo 2004-2009 y 2009-2014 y están referidos a la superficie de 2007 y 2014 (CONAFOR, 2018). Esto es, corresponde a las existencias totales estimadas con los datos del ciclo de muestreo del INFYS 2004-2009 referidas a la superficie de 2007, reportada en la serie IV de la *Carta de uso de suelo y vegetación* del INEGI y las existencias totales realizadas con los datos del INFYS para el periodo 2009-2014 con referencia a la superficie de 2014 correspondiente a la serie VI del INEGI. Para dar un valor más adecuado, "... se distingue la fase sucesional primaria y secundaria de la vegetación, que refleja de manera más acertada la productividad de los ecosistemas..." (CONAFOR, 2018, p. 150).

La información del carbono orgánico en suelos (COS) corresponde a las estimaciones armonizadas por Paz-Pellat *et al.* (2016), donde se utilizan las estimaciones del *Informe México* de FAO FRA de las series II (1993), III (2002) y IV (2007) (CONAFOR, 2010) para generar estimaciones multitemporales del COS en los ecosistemas de México, las cuales corresponden a las series V (2011) y VI (2014). Para generar las estimaciones de esta última serie, se utilizaron los mismos procedimientos y metodologías que utilizó el INEGI para el desarrollo de las series II, III, IV y V.⁴⁵ Se considera el COS a una profundidad de 0-30 centímetros que corresponde, aproximadamente, a 50 % del carbón acumulado estimado para 1 metro de profundidad (Paz Pellat *et al.* 2016).⁴⁶ Ello es consistente con las directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006) que recomienda utilizar estimaciones para el almacenamiento de carbono en suelos para 0 a 30 centímetros de profundidad (Paz y Etchevers, 2016).

La información georreferenciada se obtiene considerando que:

- Se utilizan los volúmenes de almacenamiento y secuestro de carbono en biomasa y suelos reportados en el Inventario Nacional Forestal y en Paz-Pellat *et al.* (2016, 2012, 2010); se calculó el valor medio por hectárea de los servicios de almacenamiento y secuestro de carbono para cada uno de los tipos de vegetación.

45 No se incluye carbono inorgánico en suelos (CIS) (Paz y Etchevers, 2016a).

46 Los errores en las estimaciones entre 0 y 30 cm utilizando el método del IPCC del nivel 1 son menores a 10 % (Paz y Pellat *et al.*, 2016).

- En el cálculo del valor por hectárea se utilizaron tasas de interés de 2 y 4 %, así como costos sociales del carbono de 25 y 30 dólares por tonelada de carbono.
- Se utilizó un tipo de cambio de 13.30 pesos mexicanos por 1 dólar.
- Se usó el Índice de Precios Implícitos, o deflactor del PIB, para obtener los valores en precios de 2013.
- Los valores obtenidos en los pasos anteriores se asociaron con los usos de suelo y vegetación correspondiente en la *Carta de uso de suelo y vegetación. Serie VI* publicada por el INEGI.

6.3.2.2 Método

El servicio general de carbono del ecosistema corresponde, en primer lugar, al servicio de almacenamiento de carbono en los árboles, pasto, plantas, vegetación y suelos correspondiente a la retención o al flujo evitado de carbono en la atmósfera como consecuencia de mantener el acervo (*stock*) de carbono secuestrado (UN, 2014, p. 65) y, en segundo lugar, al servicio de captura o secuestro de carbono que corresponde al proceso donde el CO₂ es capturado de la atmósfera y almacenado en boques, vegetación y suelos y que representa la acumulación neta de carbono en el ecosistema (UN, 2014, p. 65). De este modo, el secuestro y almacenamiento de carbono se consideran servicios regulatorios⁴⁷ finales o finales/intermedios del ecosistema que contribuyen a reducir los potenciales efectos negativos del cambio climático (UN, 2019, p. 79; Horlings *et al.*, 2019a).

La valoración monetaria del servicio de almacenamiento y secuestro de carbono tiene como marco contable que el carbono almacenado en el periodo $t-1$ más el carbono neto secuestrado entre el periodo t y $t-1$ corresponde al carbono total almacenado en el periodo (ecuación (4)):

$$(4) \quad C_t = C_{t-1} + \Delta C_t$$

donde C_t representa el total del carbono almacenado en el periodo t , C_{t-1} es el carbono almacenado en el periodo $t-1$ y ΔC_t es el secuestro neto de carbono entre el periodo $t-1$ y t .

47 El servicio corresponde al almacenamiento y secuestro de carbono de largo plazo y no incluye, por lo tanto, los ciclos cortos de carbono (Horlings *et al.*, 2019a).

La valoración monetaria del servicio de carbono, incluyendo almacenamiento y secuestro de carbono, considera el valor monetario anual del almacenamiento de carbono en el periodo $t-1$ (considerando el flujo anual de la tasa de interés) y el valor monetario del secuestro de carbono en el periodo (ecuación (5)). Ello busca incorporar los ajustes correspondientes a un activo ambiental:

$$(5) \quad VTC_t = VAC_{t-1} + V\Delta C_t$$

donde VTC_t representa el valor monetario total del servicio conjunto de captura y almacenamiento de carbono, VAC_{t-1} es el valor monetario del almacenamiento de carbono y $V\Delta C_t$ es el valor monetario del secuestro de carbono. Con (Edens *et al.*, 2019):

$$(6) \quad VAC_{t-1} = r_t * (C_t * PC)$$

donde r_t representa las tasas de interés utilizadas, que corresponden a:

- Tasa social de descuento: 2 % anual.
- Tasa de interés de mercado: 4 % anual.

Este método de estimación del servicio de carbono permite:

- Consistencia con las estrategias de política pública de cambio climático derivadas, por ejemplo, del Acuerdo de París.
- Consistencia con la teoría de activos de capital y sus flujos.
- Incorporar en la valoración monetaria al conjunto del ecosistema en el servicio de carbono.

Las fuentes de los cambios en el secuestro de carbono pueden, además, identificarse a través de las ecuaciones (7.a) y (7.b):

$$(7.a) \quad \Delta C_{Bt} = \alpha_{Bt-1}(BIO_t - BIO_{t-1}) + (\alpha_{Bt} - \alpha_{Bt-1}) BIO_t$$

$$(7.b) \quad \Delta C_{St} = \alpha_{St-1}(SUE_t - SUE_{t-1}) + (\alpha_{St} - \alpha_{St-1}) SUE_t$$

donde los coeficientes de biomasa a carbono se definen como:

$$(8.a.) \quad \alpha_{Bit} = \left[\frac{C_{jt}}{BIO_{jt}} \right]$$

$$(8.b.) \quad \alpha_{sit} = \left[\frac{C_{jt}}{SUE_{jt}} \right]$$

donde BIO_t representa la biomasa en los distintos tipos de bosques y vegetación; SUE_t , el tipo de suelo que se asocia a distintos niveles de almacenamiento de carbono orgánico; y α_{Bt} y α_{St} son los coeficientes de carbono contenido en cada tipo de bosques y vegetación para biomásas (B) y para suelos (S). Los subíndices corresponden al tiempo t y $t - 1$ y j , al tipo de vegetación o suelos.

6.3.3 Resultados

6.3.3.1 Flujos físicos

La información disponible indica que el carbono almacenado en biomasa aumentó de 1 299.7 millones de toneladas de carbono (tC) en el ciclo 2004-2009 a 1 420.5 millones en el ciclo 2009-2014 (CONAFOR, 2018, p. 83). De este modo, el secuestro de carbono aumentó en 122.4 millones de tC, con un incremento neto de 120.75 millones en la superficie forestal debido a una pérdida neta en zonas semiáridas y otras áreas forestales de 1.6 millones de tC (CONAFOR, 2018, p. 152) (cuadro 6-9). Este aumento es diverso por tipo de vegetación.

Cuadro 6-9. Existencias agregadas de carbono en vegetación primaria y secundaria (millones de toneladas)

Ciclo	Vegetación primaria	Vegetación secundaria	Existencias totales
2009-2014	802.11	618.36	1 420.47
2004-2009	766.16	533.56	1 299.72
Secuestro: 2009-2014 menos 2004-2009	35.95	84.80	120.75
Secuestro anual 2007-2014 (promedio)	5.14	12.11	17.25

Nota: los ciclos 2004-2009 y 2009-2014 utilizan información sobre la superficie y usos de suelo de 2007 y 2014, respectivamente; la estimación del secuestro de carbono anual se obtiene de dividir el flujo de secuestro de carbono para el periodo 2007-2014 (véase también SEMARNAT-INECC, 2006 y 2009, y Sánchez-Colón, 2019).

Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR (2018, pp. 154-155).

La información disponible permite estimar que el COS total en suelos en 2014 fue de 9 152.47 millones de tC y el secuestro de carbono en suelos se estima en 24.46 millones de tC entre 2007 y 2014 con una importante heterogeneidad por tipo de suelo (cuadro 6-10).

Cuadro 6-10. Carbono almacenado y secuestrado en suelos: 2007 y 2014: tC/ha/año

	2007	2014	2014-2007
Carbono almacenado total (millones de t)	9 128.01	9 152.47	
Secuestro de carbono 2007-2014 (millones de t)			24.46
Secuestro de carbono anual (promedio-millones de t)			3.49
Carbono almacenado total (t/ha)	46.97	47.10	

Fuente: elaboración propia con base en Paz Pellat (2016).

Así, la evidencia disponible sobre el marco contable muestra que el aumento del secuestro de carbono entre 2007 y 2014 se asocia al incremento de la biomasa en el mismo periodo, no obstante, una reducción de su capacidad de retener carbono, ecuación (7.a); además, demostró que atendiendo al tipo de formación forestal se observa que en la mayoría de los tipos de bosques y vegetación, con algunas excepciones como selvas bajas y zonas semiáridas, se incrementó el secuestro de carbono derivado del aumento de la biomasa no obstante la reducción de la capacidad de almacenamiento de carbono en la biomasa (cuadros 6-11 y 6-12; figuras 6-15 y 6-16) (CONAFOR, 2018, pp. 146-151).

Cuadro 6-11. Cambios en los coeficientes en biomasa y secuestro de carbono en vegetación primaria y secundaria (millones de toneladas y coeficientes)

Formación forestal	Cambios entre ciclos 2004-2009 y 2009-2014		Coeficientes del secuestro de carbono en biomasa		
	Cambio en biomasa	Secuestro de carbono	α_t	α_{t-1}	$\alpha_t - \alpha_{t-1}$
Primaria	109.78	35.95	0.4509	0.4590	-0.0081
Secundaria	187.37	84.80	0.4537	0.4539	-0.0002
Total	297.16	120.75	0.4521	0.4569	-0.0048

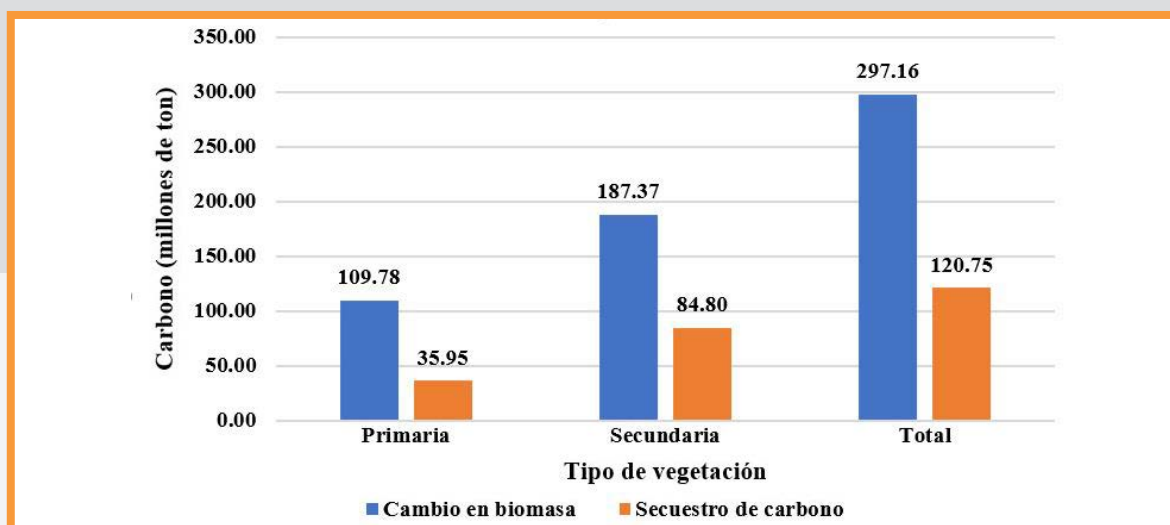
Fuente: elaboración propia con base de CONAFOR (2018).

Cuadro 6-12. Coeficientes en biomasa y secuestro de carbono (ecuación 7.a)

Ecosistema	Formación forestal	Cambios entre ciclos 2004-2009 y 2009-2014		Coeficientes de secuestro de carbono en biomasa		
		Cambio en biomasa (millones de t)	Secuestro de carbono (millones de t)	α_{Bt}	α_{Bt-1}	$\alpha_{Bt} - \alpha_{Bt-1}$
Bosque	Coníferas	26.32	12.41	0.4727	0.4728	-0.0001
	Coníferas y latifoliadas	51.10	23.37	0.4675	0.4683	-0.0008
	Latifoliadas	29.10	13.13	0.4579	0.4584	-0.0005
	Bosque mesófilo	16.80	7.66	0.4675	0.4690	-0.0015
Selvas	Selvas altas y medianas	112.76	36.35	0.4277	0.4446	-0.0169
	Selvas bajas	62.61	28.16	0.4417	0.4403	0.0014
Otras asociaciones		0.00	0.00	NA	NA	NA
Manglar		2.99	1.28	0.4356	0.4364	-0.0008
Subtotal arbolado		301.69	122.36	0.4524	0.4576	-0.0053
Matorral xerófilo	Zonas semiáridas	-9.74	-3.88	0.4354	0.4310	0.0044
	Zonas áridas					
Otras áreas forestales		5.22	2.27	0.4576	0.4592	-0.0015
Total forestal		297.16	120.75	0.4521	0.4569	-0.0048

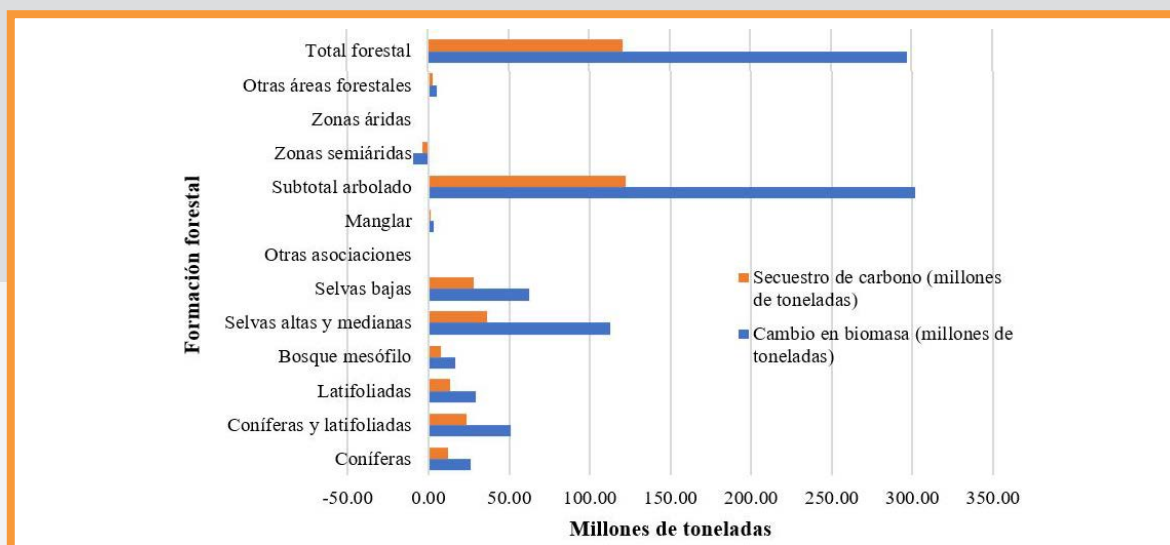
Fuente: elaboración propia con base en información de CONAFOR (2018).

Figura 6-15. Cambios en los coeficientes de biomasa y secuestro de carbono por vegetación primaria y secundaria



Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR (2018).

Figura 6-16. Cambios de los coeficientes en biomasa y secuestro de carbono



Fuente: elaboración propia con base en información de CONAFOR (2018).

Cuadro 6-13. Coeficientes de carbono orgánico en suelos y secuestro de carbono (ecuación 7.b)

Continúa

Ecosistema	Formación forestal	Coeficientes de secuestro de carbono en suelos		
		α_{St}	α_{st-1}	$(\alpha_{St} - \alpha_{st-1})$
Bosques	Bosque de ayarín	140.125	136.612	3.513
	Bosque de cedro	72.764	69.732	3.032
	Bosque de oyamel	155.428	155.997	-0.569
	Bosque de pino	74.590	72.825	1.765
	Bosque de pino-encino	63.549	63.963	-0.415
	Bosque de táscate	75.599	70.104	5.494
	Bosque de encino	50.028	50.806	-0.778
	Bosque de encino-pino	49.833	49.171	0.662
	Bosque mesófilo de montaña	135.558	123.630	11.928
	Selva alta de perennifolia	88.960	98.270	-9.310
	Selva alta de subperennifolia	53.516	52.749	0.767
	Selva mediana perennifolia	74.545	67.273	7.273
	Selva mediana subperennifolia	107.890	107.058	0.833
	Selva baja perennifolia	111.298	81.595	29.703
	Selva mediana subcaducifolia	81.093	81.224	-0.132
	Selva baja subcaducifolia	53.970	79.838	-25.868
	Selva mediana caducifolia	41.368	38.673	2.696
	Selva baja caducifolia	47.709	48.674	-0.965
	Selva baja espinosa	38.100	34.022	4.078
	Selva baja subperennifolia	146.480	123.706	22.774
	Mezquital (MKE)	62.863	31.804	31.059
	Selva de galería	186.959	73.867	113.092
	Bosque de galería	58.678	48.950	9.728
	Petén	100.626	74.038	26.589
	Manglar	96.795	89.276	7.519
	Mezquital (MK)	29.071	32.153	-3.082
	Palmar natural	40.018	26.941	13.077
	Bosque inducido	625.000	47.222	577.778
	Total (bosques)	67.442	67.125	0.318

Cuadro 6-13. Coeficientes de carbono orgánico en suelos y secuestro de carbono (ecuación 7.b)

Continúa

Ecosistema	Formación forestal	Coeficientes de secuestro de carbono en suelos		
		α_{St}	α_{st-1}	$(\alpha_{St} - \alpha_{st-1})$
Otras tierras boscosas	Matorral de coníferas	0.000	69.155	-69.155
	Matorral subtropical	41.659	43.522	-1.863
	Matorral espinoso tamaulipeco	37.356	37.539	-0.182
	Matorral sarco-crasicaule	8.722	9.766	-1.044
	Matorral sarco-crasicaule de neblina	7.501	7.834	-0.332
	Matorral sarcocaulé	12.688	12.144	0.544
	Matorral submontano	57.093	58.286	-1.194
	Chaparral	34.765	36.342	-1.577
	Mezquital (MKX)	30.058	30.515	-0.457
	Total (otras tierras boscosas)	28.463	28.988	-0.525
Otras tierras	Vegetación de galería	43.572	32.885	10.688
	Vegetación halófila (VHH)	64.767	74.032	-9.265
	Popal	150.837	169.634	-18.797
	Tular	98.630	88.399	10.232
	Vegetación de dunas costeras	12.311	12.647	-0.336
	Matorral crasicaule	34.138	33.574	0.564
	Matorral desértico micrófilo	27.020	27.878	-0.858
	Matorral desértico rosetófilo	33.803	34.220	-0.417
	Matorral rosetófilo costero	17.844	17.536	0.308
	Vegetación de desiertos arenosos	10.115	9.671	0.444
	Vegetación gipsófila	29.976	17.598	12.378
	Vegetación halófila (VH)	24.019	24.672	-0.653
	Pastizal natural	29.692	32.651	-2.958
	Pastizal halófilo	24.519	24.336	0.183
	Pastizal gipsófilo	60.048	54.710	5.338
	Pradera de alta montaña	49.660	49.235	0.425
	Sabanoide	7.943	10.351	-2.408
	Sabana	36.161	52.135	-15.974
	Pastizal inducido	53.854	47.602	6.253
	Palmar inducido	60.492	68.836	-8.344
	Información agrícola-pecuaria-forestal	46.033	46.032	0.001
	Zona urbana	43.040	39.655	3.385

Cuadro 6-13. Coeficientes de carbono orgánico en suelos y secuestro de carbono (ecuación 7.b)

Concluye

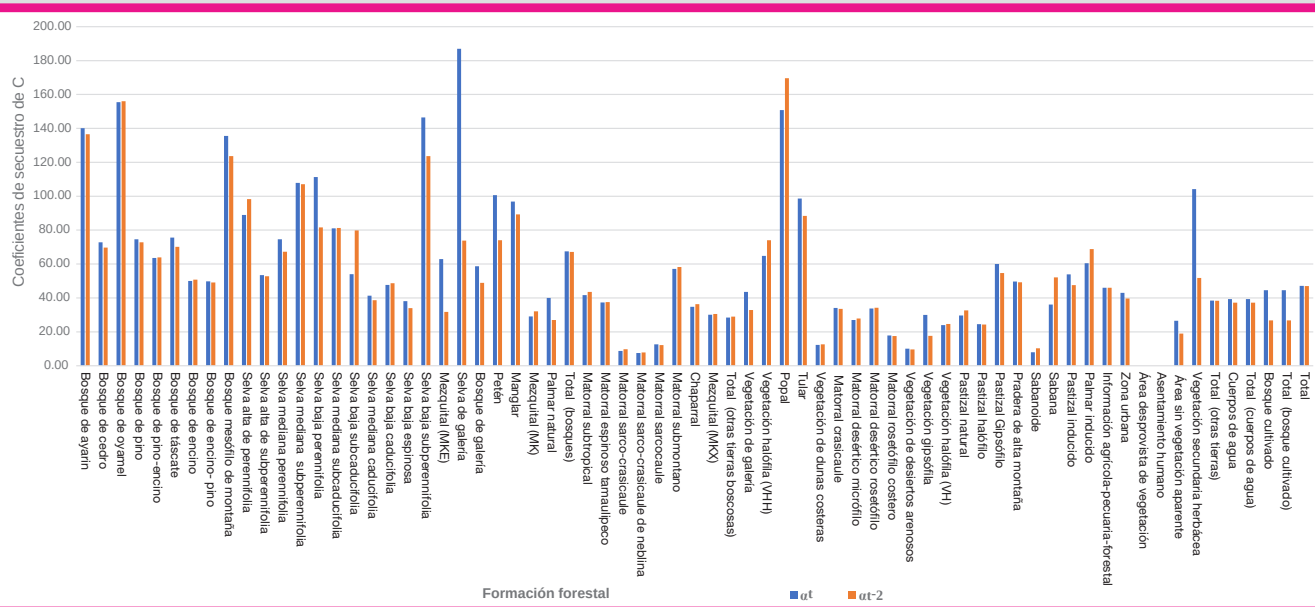
Ecosistema	Formación forestal	Coeficientes de secuestro de carbono en suelos		
		α_{St}	α_{st-1}	$(\alpha_{St} - \alpha_{st-1})$
	Área desprovista de vegetación	0.000	0.000	0.000
	Asentamiento humano	0.000	0.000	0.000
	Área sin vegetación aparente	26.536	19.029	7.506
	Vegetación secundaria herbácea	104.227	51.845	52.382
	Total (otras tierras)	38.480	38.378	0.102
Agua	Cuerpos de agua	39.350	37.269	2.082
	Total (cuerpos de agua)	39.350	37.269	2.082
Bosque cultivado	Bosque cultivado	44.527	26.716	17.811
	Total (bosque cultivado)	44.527	26.716	17.811
Totales	Total	47.101	46.975	0.126

Nota: los coeficientes corresponden a los periodos de 2007 y 2014.

Fuente: elaboración propia con base en información de INEGI (2016).

La capacidad del secuestro de carbono orgánico aumentó en la mayoría de los tipos de suelo, aunque con un comportamiento heterogéneo y algunas excepciones, ecuación (7.b) (cuadro 6-13, figura 6-17).

Figura 6-17. Coeficientes de secuestro de carbono en suelos, 2014-2007



Nota: bosque inducido se excluye por valores atípicos

Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR (2018).

6.3.3.2 Valoración monetaria del almacenamiento y secuestro de carbono

6.3.3.2.1 Valoración monetaria a nivel nacional

La valoración monetaria del secuestro y almacenamiento de carbono se basa en un precio de la tonelada de carbono de 25 dólares/tCO₂e derivado del metaanálisis de Alatorre *et al.* (2019)

Cuadro 6-14. Estimaciones del costo social del carbono (CSC) con un metaanálisis: efectos aleatorios (dólares americanos)

Parámetro	Total	Tasa 1	Tasa 2	Tasa 3	Tasa 4
<i>M</i>	\$25.83	\$100.63	\$16.47	\$30.14	\$6.29
Intervalo de confianza	[24.99-26.67]	[42.96-158.30]	[15.72-17.22]	[17.15-43.18]	[4.08-8.50]
Pruebas de heterogeneidad					
<i>T</i> ²	3.25***	0.0003***	1.71***	421.7***	0.00
<i>Q-stat</i>	37 477***	9 914***	19 520***	2 131***	14.03
<i>I</i> ²	0.99***	0.99***	0.99***	0.97***	0.00
<i>N</i>	232	62	75	58	31

Nota: *** denota rechazo de la hipótesis nula con 99 % de confianza, *Q-Stat* se refiere al estadístico *Q* de la prueba de homogeneidad (Cooper *et al.*, 1994), *I*² mide la proporción de la variación total que se debe a la heterogeneidad (Cooper *et al.*, 1994) y *N* representa el número de estudios de la muestra; *H0*: todos los estudios en la muestra comparten una media poblacional común; la Tasa 1 corresponde a tasas de descuento entre 0 y 0.3 %; la Tasa 2, a tasas de descuento entre 1 y 1.5 %; la Tasa 3, a tasas de 2 a 3.5 %; y la Tasa 4, a tasas de descuento superiores a 4 %; los resultados están referidos en dólares estadounidenses; en los intervalos sin tasas no existen estudios identificados.

Fuente: Alatorre *et al.* (2019).

(cuadro 6-14) y un escenario alternativo de un precio a la tonelada de CO₂e de 30 dólares/tCO₂e que refleja el precio promedio en la literatura reciente (Howard y Sterner, 2017).

El valor monetario del servicio anual de almacenamiento y secuestro de carbono en biomasa y de COS, con 25 dólares y tasa de interés de 2 % anual, equivale a 0.308 % del PIB de 2013 y a 0.315 % del PIB de 2014⁴⁸ y a 1.33 % del PIB de 2013 y a 1.35 % del PIB de 2014, respectivamente (cuadro 6-15). Finalmente, el valor monetario agregado del almacenamiento y secuestro de carbono es de 266 254 millones de pesos de 2013 que corresponde a 1.64 % del PIB de 2013 y de 1.67 % del PIB de 2014 con 25 dólares/tCO₂e y 2 % de tasa de interés anual (cuadro 6-15). Esto indica que el valor monetario del almacenamiento y secuestro de carbono es relevante en la economía mexicana. El uso de un precio de 30 dólares/tCO₂e y 4 % de tasa de interés anual lleva a un valor de 3.75 % del PIB de 2013.

48 Se utiliza el tipo de cambio reportado por el INEGI para transformar de dólares a pesos 13.30 MXN por USD.

Cuadro 6-15. Valor monetario del servicio de almacenamiento y secuestro de carbono en biomasa aérea viva y en carbono orgánico en suelos, 2014

Biomasa aérea viva y carbono orgánico en suelos (millones de pesos y porcentaje del PIB nacional)						
	Almacenamiento		Secuestro		2007-2014	
	Valor	% del PIB	Valor	% del PIB	Valor	% del PIB
25 dólares tCO ₂ y tasa 2 %						
Almacenamiento más secuestro (anual)	254 262.92	1.52	25 290.11	0.15	279 553.03	1.67
25 dólares tCO ₂ y tasa 4 %						
Almacenamiento más secuestro (anual)	508 525.85	3.04	25 290.11	0.15	533 815.96	3.19
30 dólares tCO ₂ y tasa 2 %						
Almacenamiento más secuestro (anual)	305 115.51	1.82	30 348.13	0.18	335 463.64	2.00
30 dólares tCO ₂ y tasa 4 %						
Almacenamiento más secuestro (anual)	610 231.02	3.64	30 348.13	0.18	640 579.15	3.83
Valores en pesos y como porcentaje del PIB de 2013						
25 dólares tCO ₂ y tasa 2 %						
Almacenamiento más secuestro (anual)	242 166.94	1.49	24 086.99	0.15	266 253.93	1.64
25 dólares tCO ₂ y tasa 4 %						
Almacenamiento más secuestro (anual)	484 333.88	2.98	24 086.99	0.15	508 420.87	3.12
30 dólares tCO ₂ y tasa 2 %						
Almacenamiento más secuestro (anual)	290 600.33	1.79	28 904.39	0.18	319 504.71	1.96
30 dólares tCO ₂ y tasa 4 %						
Almacenamiento más secuestro (anual)	581 200.65	3.57	28 904.39	0.18	610 105.04	3.75

Fuente: elaboración propia; año base 2013.

6.3.3.2.2 Valoración monetaria del almacenamiento y secuestro de carbono: una visión georreferenciada

El valor monetario georreferenciado⁴⁹ del servicio de carbono de almacenamiento y secuestro en biomasa viva y del carbono orgánico en suelos, con 25-30 dólares/tCO₂ y 2-4 % de tasa de interés, por tipo de vegetación y bosque para 2007 y 2014 se presentan en los mapas 6-13 y 6-14. La valoración monetaria georreferenciada muestra un alto valor del almacenamiento y secuestro de carbono, principalmente en el sur y occidente de México, tanto en biomasa como en suelos. Ello muestra la relevancia ambiental y económica que tiene los ecosistemas en esa región y la importancia de su preservación para el desarrollo regional.

49 La clasificación de INEGI incluye 58 tipos diferentes de vegetación que se agregan, para motivos de comparación y manejo, en 14 tipos de vegetación, de los cuales 12 pueden ser separados en vegetación primaria o secundaria, cinco tipos de uso de suelo y dos clases auxiliares.

Mapa 6-13. Valor del servicio anual de almacenamiento y secuestro de carbono en biomasa (pesos de 2013 por ha), 25 dólares y tasa de descuento de 2 por ciento



Mapa 6.14. Valor del servicio anual de almacenamiento y secuestro de carbono orgánico en suelos (pesos de 2013 por ha), 25 dólares y tasa de descuento de 2 por ciento



6.3.4 Discusión

6.3.4.1 Conclusiones y comentarios generales

El cambio climático se concibe como una externalidad negativa global que pone en riesgo a un bien público global, como el clima. De este modo, el almacenamiento de carbono y el secuestro de carbono representan un servicio de regulación (intermedio y/o final) de los ecosistemas que reduce los impactos negativos del cambio climático.

La estimación del valor monetario anual del servicio de almacenamiento y secuestro de carbono, con 25 dólares la tonelada de CO_2 y 2 % de tasa de interés, entre 2007-2014, en biomasa fue de 0.309 % del PIB de 2013 y de 0.315 % del PIB de 2014 y en carbono orgánico en suelos, de 1.33 % del PIB en 2013 y de 1.35 % del PIB de 2014. De este modo, el valor monetario promedio del servicio anual del almacenamiento y secuestro de carbono en biomasa y suelos, entre 2007-2014, fue de 1.64 % del PIB de 2013 y de 1.67 % del PIB de 2014. Este valor monetario aumenta significativamente utilizando 30 dólares/ tCO_2e y 4 % de tasa de interés.

El valor monetario del servicio de almacenamiento anual y secuestro de carbono es particularmente sensible a los supuestos del costo social del carbono y de tasa de interés. Ello sugiere la presencia de un comportamiento no lineal, de doble canal de causalidad entre los flujos físicos y monetarios de los ecosistemas y de una independencia relativa de la valoración monetaria de las condiciones físicas.

6.3.4.2 Recomendaciones

- La incorporación del almacenamiento y secuestro de carbono en la valoración monetaria permite:
 - Consistencia con las estrategias de política pública de cambio climático derivadas, por ejemplo, del Acuerdo de París.
 - Consistencia con la teoría de activos de capital y sus flujos.
 - Incorporar en la valoración monetaria al conjunto del ecosistema en el servicio de carbono.
- Es necesario incorporar una visión conceptual en la contabilidad de los ecosistemas que el valor monetario del servicio de almacenamiento anual y secuestro de carbono es particularmente sensible a los supuestos del costo social del carbono y a la tasa de interés. Ello sugiere la presencia de un comportamiento no lineal, de doble canal de causalidad entre los flujos físicos y monetarios de los ecosistemas y de una independencia relativa de la valoración monetaria.

6.3.4.3 Áreas de oportunidad

La evidencia disponible muestra que es necesario profundizar en la contabilidad de los flujos físicos del almacenamiento y secuestro de carbono. Ello es fundamental, por ejemplo, para construir una estrategia donde los bosques puedan incorporarse en un mecanismo para comprar permisos de emisiones (*offsets*) por otras actividades económicas.

6.4 Servicio de polinización

Mensajes clave

La evidencia disponible muestra que el servicio de polinización animal y, por lo tanto, su pérdida es relevante para la producción agrícola en México. En efecto, el valor monetario, a nivel municipal, de la demanda potencial del servicio de polinización representó 12.09 % del valor de la producción agrícola en 2013 y, en promedio, 12.73 % entre 2003-2018. Las estimaciones con base en la ENA 2014 proveen de resultados similares con un valor monetario de la demanda del servicio de polinización animal que representó 11.48 % de la producción agrícola en 2014. En contrapartida, a nivel agregado, la oferta potencial promedio de polinización animal, para 2013, fue de 7.74 % de la producción agrícola y, en promedio para el periodo 2003-2017, de 8.15 %; además, la contribución monetaria del servicio de polinización, derivado de la oferta de polinización ajustado por la proximidad a los hábitats, en 2013, fue de 32 277 millones de pesos de 2013 que correspondieron a 7.74 % del valor de la producción bruta agrícola y, en promedio entre 2003-2018, de 0.21 % del PIB total (cuadro 6-18).

Estos resultados muestran que existe un déficit entre la oferta de polinización y la demanda potenciales consecuencia del actual estilo de desarrollo agropecuario.

Existen, además, formas y capacidad de apropiación de la contribución monetaria del servicio de polinización animal en la producción agrícola diferenciado por tipo de productores y/o producción. Ello debe ser considerado en la construcción de políticas públicas agropecuarias y sociales.

Estas estimaciones muestran que la contribución monetaria de los servicios de polinización de los ecosistemas presenta una volatilidad que se asocia, parcialmente, a modificaciones en la estructura de la producción agrícola. Por ejemplo, destaca la creciente relevancia económica de cultivos como el aguacate asociado a eventos como el *Super Bowl*. De este modo, el comportamiento del valor monetario del servicio de polinización tiene una dependencia, no lineal, con la evolución de la estructura de la producción agrícola y, por lo tanto, una independencia relativa de los flujos físicos.

6.4.1 Introducción

La polinización por animales es un servicio regulatorio de los ecosistemas que consiste en la contribución a la fertilización a través de abejas, insectos, mariposas, aves o murciélagos y otros animales, que aumenta la cantidad y calidad de los cultivos agrícolas y ayuda a su preservación. La valoración monetaria de este servicio de polinización por animales resulta relevante en México, en primer lugar, por su contribución a la producción agrícola y, por lo tanto, a su contribución indirecta al bienestar de la población y a las actividades económicas. En segundo lugar, a que permite identificar las potenciales consecuencias y costos de la pérdida del servicio de polinización. En tercer lugar, a la importancia de incluir el valor monetario de la polinización por animales en los análisis de política pública y costo beneficio, por ejemplo, en relación con el cambio del uso de suelo. En cuarto lugar, sirve para destacar la importancia del capital natural en el contexto de un desarrollo sustentable. Esta valoración monetaria es, además, particularmente relevante tomando en cuenta que el servicio de polinización es considerado como un servicio emblemático de los ecosistemas. De este modo, el objetivo de este capítulo es estimar el valor monetario del servicio de regulación de polinización por animales en la producción agrícola.

6.4.2 Datos y métodos

6.4.2.1 Fuentes de información

La base de datos del servicio de polinización por animales utiliza la siguiente información a niveles municipal y de unidad de producción:

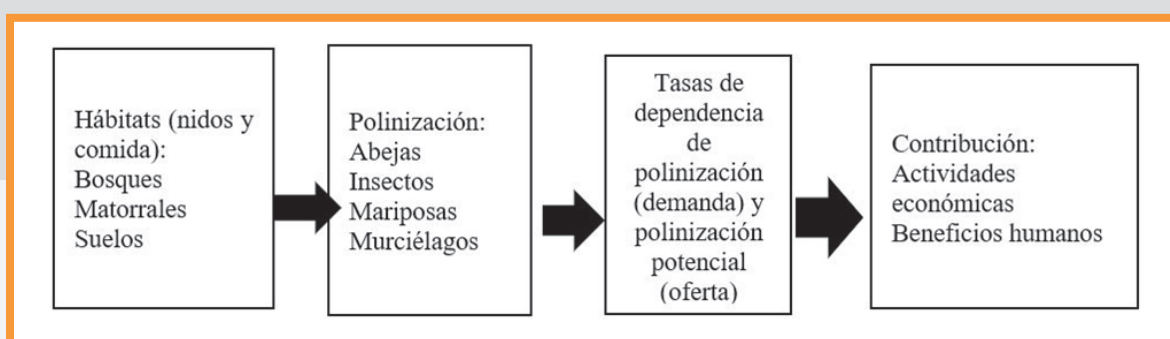
- El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) publica el valor de la producción, volumen de producción, rendimiento por hectárea, precio medio rural, modalidad hídrica y ciclo de producción de alrededor de 310 diferentes cultivos producidos en los 2 435 municipios de México. Con ello, es posible asignar las tasas de dependencia de polinización animal a cada uno de los cultivos producidos en México.
- La Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2014 recolecta información sobre el volumen de producción, rendimiento por hectárea, precio de venta, modalidad hídrica y ciclo de producción de una extensa variedad de cultivos producidos en el ciclo agrícola 2013-2014. Dicha encuesta cuenta con representatividad a nivel nacional para los 29 cultivos más importantes en México. Para mantener la consistencia con el análisis a nivel municipal, se utilizan los precios medios rurales del SIAP para valorar el volumen total de producción, incluso el que se utiliza para consumo propio (producción no vendida).
- En lo que respecta a la información georreferenciada de los servicios de polinización, esta es consistente con la información del capítulo agrícola.
- Por su parte, la información de la oferta potencial se estima con la herramienta *InVest* disponible en <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest-models/crop-pollination>.

6.4.2.2 Método de valoración monetaria del servicio de polinización animal

El servicio de polinización que proveen los ecosistemas consiste en la fertilización de los cultivos a través de la acumulación y movimiento de polen realizado a través de insectos (abejas, moscas, polillas o mariposas), murciélagos, aves y otros (Klein *et al.*, 2007; Ricketts *et al.*,

2008), por lo que es necesario disponer entonces de hábitats, nidos, cavernas, bosques, matorrales, suelos y flora, polen y néctar adecuados adyacentes o cercanos a las áreas de producción agrícola (Horlings *et al.*, 2019b, pp. 33-34 y 78). Este proceso de polinización animal contribuye a la producción y a la productividad agrícola, a la calidad de los productos agrícolas y a reducir las pérdidas y la varianza en la producción agrícola (Horlings *et al.*, 2019b, pp. 32, 33 y 46) (figura 6-18).

Figura 6-18. Servicio de regulación de la polinización por animales en la producción agrícola



Fuente: elaboración propia.

La evidencia disponible sobre la contribución del servicio de polinización por animales a la producción agrícola indica que es relevante, aunque heterogénea dependiendo del tipo de cultivo y otros factores. Por ejemplo, Klein *et al.* (2007) estiman que 35 % de los cultivos de la producción global dependen de la polinización animal, que 60 % de la producción global proviene de cultivos que no dependen de la polinización animal y 5 % aún no está definido y que 87 de 124 cultivos (alrededor de 70 %) para consumo humano dependen del proceso de polinización, y Gallai *et al.* (2009a y 2009b) estiman que la contribución económica de la polinización (por ejemplo *Insect pollination economic value-IPEV*) al valor del producto total para Centroamérica y Sudamérica se ubica entre 6.1 y 6.6 % y en América del Norte contribuye en alrededor de 11.4 por ciento.

Existen diversos métodos para estimar el valor del servicio de polinización, destacando:

1. El de mercado, donde se estima el precio de mercado de la polinización que ya es una práctica comercial establecida, por ejemplo, en Estados Unidos de América, Canadá y Nueva Zelanda a través de la compra o renta de abejas.
2. El del valor de reemplazo del servicio de polinización, que estima los costos de reemplazar este servicio, por ejemplo, a través de polinización administrada o por otros medios.

3. El del valor monetario total del servicio de polinización, donde el valor monetario de la polinización es equivalente al valor total de los cultivos polinizados.
4. El del valor monetario de la polinización basado en las razones de dependencia (RD) de los cultivos polinizados, que considera que la polinización contribuye con una parte de la producción agrícola, aunque de manera diferenciada por tipos de cultivos.⁵⁰
5. El de la función de producción, donde la contribución marginal que tiene el servicio de polinización animal sobre el producto representa el valor monetario de dicho servicio (Hanley *et al.*, 2015).

En este estudio se utiliza el método de la razón de dependencia (RD), junto con un Índice de Oferta y Demanda Potencial de Polinizadores Animales, para la valoración monetaria del servicio de polinización animal de la producción agrícola (Klein *et al.*, 2007; Gallai *et al.*, 2009b; Gallai y Vaissière, 2009a; Horlings *et al.*, 2019a y 2019b; Smith *et al.*, 2011). Ello puede representarse de acuerdo con la ecuación (10.a), que se concentra en el impacto de la polinización animal en la función de producción o de acuerdo con la ecuación (10.b), que identifica la pérdida del servicio de polinización (Hanley *et al.*, 2015; Vaissiere *et al.*, 2011):

$$(10.a) \quad Y_{jt} = F(X_{jt}) + A_{jt} + u_{jt}$$

$$(10.b) \quad Y_{jt} = F[ins_{jt}, otro_{jt}, polin_{jt}, \epsilon_{jt}] + u_{jt}$$

donde Y_{jt} representa la producción del cultivo j incluyendo su rendimiento del cultivo por polinización medido en unidades físicas o monetarias, normalmente en producto por hectárea por año, X_{jt} es el nivel de polinización, F corresponde a la relación entre el nivel de polinización⁵¹ X_{jt} y la producción Y_{jt} , A representa el rendimiento del cultivo j consecuencia de un proceso autónomo de la polinización, ins_{jt} corresponde a los insumos totales, $polin_{jt}$ es el servicio de polinización, $otro_{jt}$ son otras variables de control, ϵ_{jt} son variables estocásticas como el clima, u_{jt} es el término de error y los subíndices j corresponden al cultivo y t , al periodo. De este modo, $F(X_{jt})$ indica la tasa de dependencia de la producción del cultivo j al proceso de polinización (Vaissiere *et al.*, 2011) y corresponde al flujo de producción derivado de la polinización (Klein *et al.*, 2007).

50 Una variación del método de razones de dependencia de polinización corresponde al método del ingreso neto, donde las tasas de dependencia de polinización se aplican exclusivamente el ingreso neto (Winfree *et al.*, 2011).

51 El nivel de polinización incluye la densidad de polinizadores y su diversidad.

Así, la demanda potencial del servicio de regulación final derivado de las tasas de dependencia de la polinización puede estimarse de acuerdo con la ecuación (11) (Gallai *et al.*, 2009a):

$$(11) \quad IPEV_t = \sum_{j=1}^j \sum_{t=1}^t (P_{jt} * Q_{jt} * D_{jt} * \rho)$$

donde $IPEV_t$ es la demanda del valor económico total de la polinización, P_{jt} es el precio del cultivo j , Q_{jt} es la cantidad producida, D_{jt} es la razón de dependencia del cultivo j de la polinización, ρ representa un parámetro entre 0 y 1 que busca capturar el efecto del déficit de polinización y los subíndices j corresponden a los cultivos y t , al tiempo.

La evidencia muestra que factores como la intensificación de la agricultura, el cambio de uso de suelo, el uso intensivo de pesticidas, la introducción de nuevas especies, patógenos y parásitos, el cambio climático y la pérdida de hábitats naturales reduce y pone en riesgo a estos procesos de polinización animal (Hanley *et al.*, 2015; Guimaraes *et al.*, 2020; Klein *et al.* 2007). De este modo, las tasas de dependencia de polinización para diferentes cultivos pueden presentar un déficit de polinización en monto, compatibilidad o temporalidad (Vaissiere *et al.*, 2011). Para identificar los posibles déficits, se construye un modelo de oferta potencial de polinización animal donde la oferta potencial de polinización por cultivo se deriva de una estimación de los nidos y nutrientes del suelo y la distancia entre el hábitat de los polinizadores y las superficies de cultivo y de oferta potencial de polinización ajustada por distancia. Este déficit puede, además, incluirse a través del coeficiente ρ en la ecuación (11).

6.4.3 Resultados

6.4.3.1 Hechos estilizados y flujos físicos en polinización

La evidencia disponible sobre las tasas de dependencia para diversos cultivos se sintetiza en el cuadro 6-16 con base las razones de dependencia de Klein *et al.* (2007). Ello muestra que, por ejemplo, la producción de algunas frutas, semillas y nueces se reduce hasta 90 % sin polinizadores (Southwick y Southwick, 1992), que la polinización es indispensable para la producción de productos como cocoa y vainilla (Vaissiere *et al.*, 2011) o que la polinización animal no es relevante para la producción de algunos cereales. Ello sugiere que la importancia económica de la polinización en el PIB está asociada a la estructura de la producción agrícola.

Cuadro 6-16. Tasas de dependencia de los cultivos al servicio de polinización basado en la pérdida de rendimiento en ausencia de polinizadores

Continúa

Grado de dependencia	Reducción de la producción en ausencia de los polinizadores	Cultivos
Esencial	90 y 100 % (95 %)	Acerola, achiote, atemoya, cacao, calabaza, cambuci, copoazú, gliricidia, jurubeba, kiwi, macadamia, maracuyá, maracuyá dulce, melón, nuez de brasil, sandía y vainilla.
Alta	40-90 % (65 %)	Adesmia, aguacate, albaricoque, alforfón (trigo), almendra, arándano, araticum, carambola, cereza, ciruela, durazno, frambuesa, gabirola, guaraná, guayaba, jambo vermelho, mango, manzana, membrillo, nanche, níspero, nuez (anacardo), nuez de barbados, pepino y pera.
Modesta	10-40 % (25 %)	Algodón, algodón de árbol, bálsamo de manzana, berenjena, café, castaña, cereza, coco, colza, fresa, girasol, granada, grosella, haba, higo, mangaba, mora negra, okra, pimienta de cayena, ricino, semilla de sésamo y soya.

Cuadro 6-16. Tasas de dependencia de los cultivos al servicio de polinización basado en la pérdida de rendimiento en ausencia de polinizadores

Concluye

Grado de dependencia	Reducción de la producción en ausencia de los polinizadores	Cultivos
Baja	0-10 % (5 %)	Aceite de palma, caqui, chiles, ciruela de cerdo, frijol, gandul, guanábana, guisantes de vaca, juazeiro, limón, linaza, lychee, mandarina, maní, mombin, naranja, papaya, pimienta malagueta, pimienta morrón, rambután, tamarindo y tomate.
No aumento	0 %	Aceituna, ajo, alcachofa, algodón de montaña, árbol de goma, arroz, avena, camote, camote (yam), caña de azúcar, casava, cebada, cebolla, centeno, chai de la india (té), clavo, coliflor y brócoli, espárragos, jengibre, jaboticaba, lechuga, maíz, malva, mate, nuez, papa, pimienta blanca, piña, planta de seda china, plátano, sisal, tabaco, trigo, triticale, uva, yute y zanahoria.

Nota: el valor entre paréntesis es el valor medio para generar los mapas de polinización; contribución agregada del servicio de polinización a la producción agrícola y cultivos prioritarios.

Fuentes: Borneck y Bricout (1984), Robinson *et al.* (1994), Southwick y Southwick (1992), Morse y Calderón (2000), Klein *et al.* (2007), Gallai y Vaissiere (2009) y Giannini *et al.* (2015); se utilizan, principalmente, las tasas de dependencia en Klein *et al.* (2007); cuando no se reporta información, se usa información de Giannini *et al.* (2015) y, por último, de los estudios restantes.

La demanda potencial promedio del servicio de polinización, con base en las tasas de dependencia de polinización de Klein *et al.* (2007), atendiendo a la estructura⁵² por cultivos de la producción agrícola representó 50 432 millones de pesos corrientes en 2013, equivalentes a 12.09 % del valor de la producción agrícola en 2013 y 0.31 % en 2013 del PIB del mismo año (cuadro 6-17). Se observa, además, que la contribución monetaria de la demanda del servicio de polinización animal al conjunto de las actividades agrícolas es relativamente volátil, esto derivado, por ejemplo, por el alto consumo de aguacate y jitomate para la preparación de guacamole en Estados Unidos de América durante el *Super Bowl* (figura 6-19).

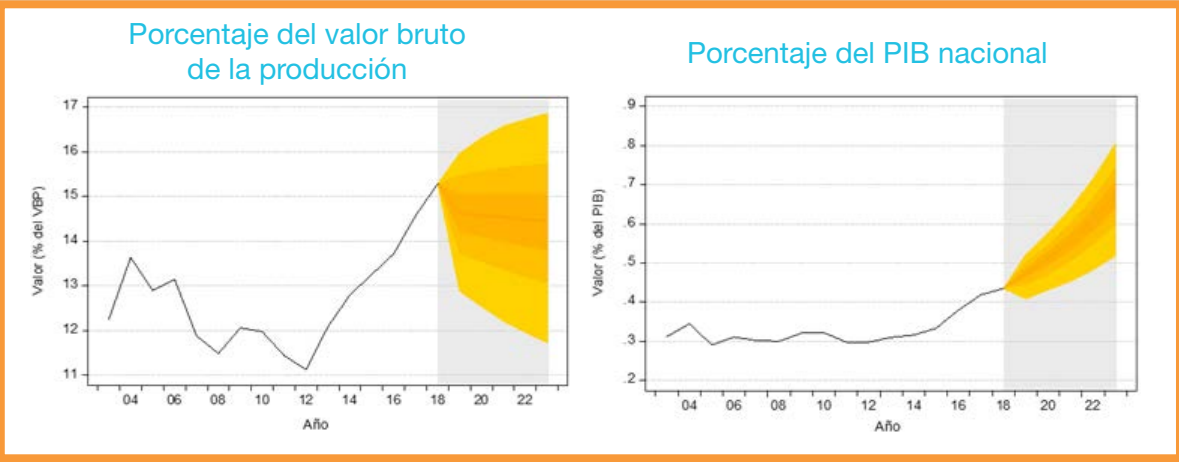
52 Por ejemplo, Guimaraes *et al.* (2020) estiman que la estructura de cultivos en México corresponde a 33.3 % que dependen de la polinización, 33.7 % que no dependen de esta y 33 % que se desconoce.

Cuadro 6-17. Valor económico de la demanda potencial de polinización animal, 2003-2018 (con tasas de dependencia)

Valor económico de la polinización				
Periodo	(millones de pesos)	(millones de pesos 2013 = 100)	(% del VBP)	(% del PIB total)
2013	50 432.48	50 432.48	12.09	0.31
Promedio (2003-2018)	49 940.84	52 252.59	12.73	0.3

Fuente: elaboración propia con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), Klein *et al.* (2007) y Giannini *et al.* (2015).

Figura 6-19. Valor económico de la demanda potencial de polinización animal, 2003-2018

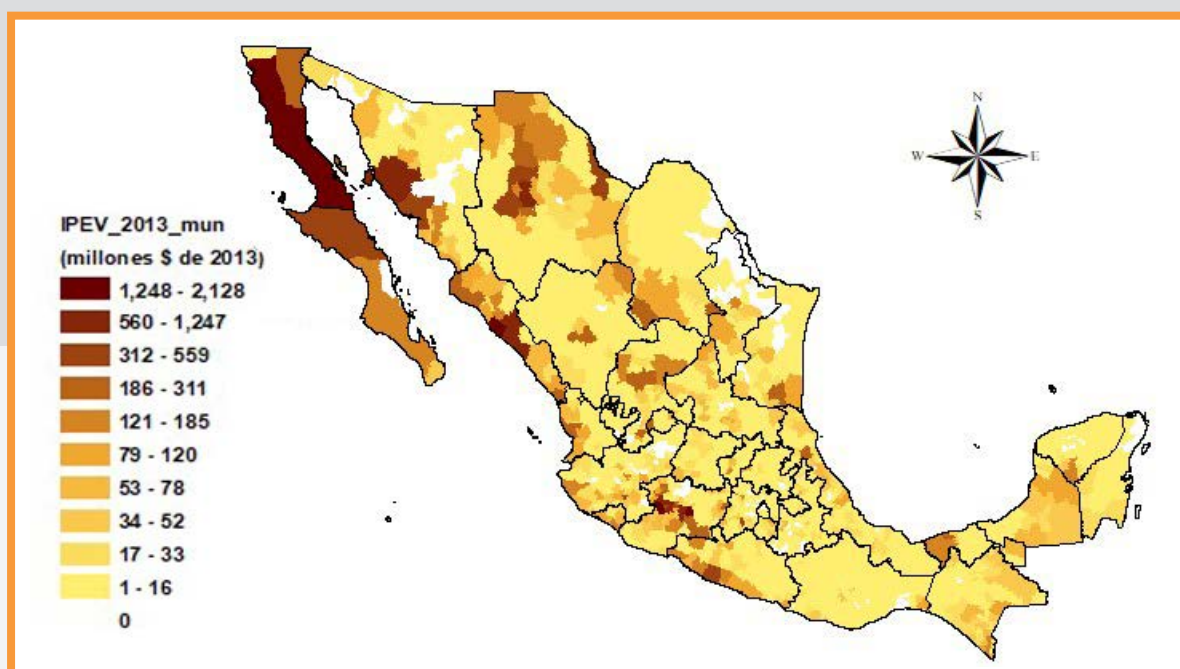


Fuente: elaboración propia con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), Klein *et al.* (2007) y Giannini *et al.* (2015).

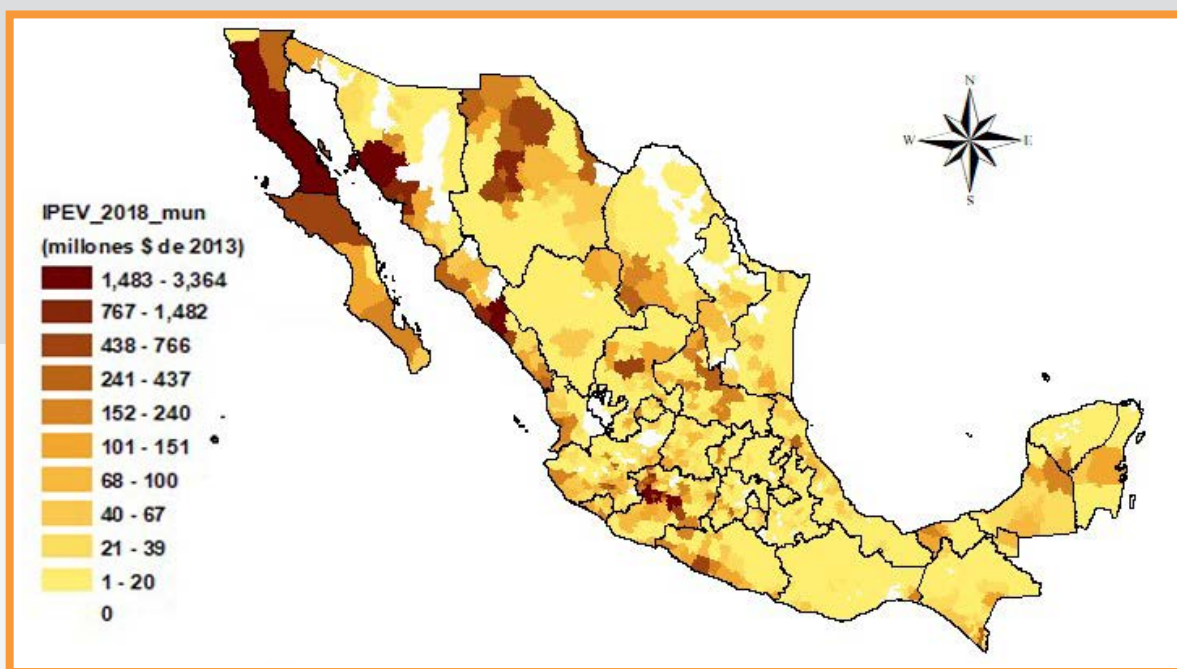
6.4.3.2 Contribución georreferenciada de la demanda potencial del servicio de polinización a la producción agrícola

Las estimaciones georreferenciadas se sintetizan en los mapas 6-15 y 6-16, donde se observa que la contribución de los servicios de polinización animal se concentra en los municipios de Ensenada (BC); Ario, Tancítaro, Uruapan, Peribán, Tacámbaro y Salvador Escalante (Michoacán de Ocampo); Hermosillo (Sonora); así como en Culiacán y Navolato (Sinaloa). Ello coincide con la producción de algunos productos agrícolas de exportación.

Mapa 6-15. Contribución georreferenciada de la demanda potencial del servicio de polinización animal a la producción agrícola para 2003 (millones de pesos)



Mapa 6-16 Contribución georreferenciada de la demanda potencial del servicio de polinización animal a la producción agrícola para 2018 (millones de pesos)



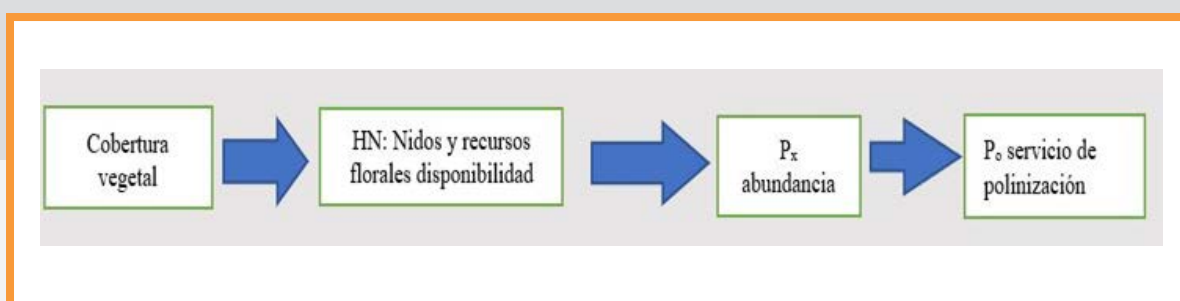
Nota: cereales (trigo-0.00, maíz-0.00, arroz-0.00, sorgo-0.00 y cebada-0.00); cultivos de bebidas y especias (café-0.25, cacao-0.95, chile seco-0.05 y chile verde-0.05); cultivos de semillas oleaginosas (soya-0.25, cacahuete-NA y coco copra-0.25); frutas y nueces (aguacate-0.65, plátano-0.00, mango-0.65, papaya-0.05, piña-0.00, limón-0.05, naranja-0.25, uva-NA, frambuesa-0.65, fresa-0.25, zarzamora-0.25, manzana-0.65, durazno-0.65, guayaba-0.65 y nuez-0.00); leguminosas (frijol-0.05 y garbanzo-NA); otros cultivos (agave-NA, alfalfa-NA, algodón-0.25, nopal-NA, pastos-NA, tuna-NA, caña-0.00 y papa-0.00); y vegetales y melones (espárragos-0.00, lechuga-0.00, jitomate-0.65, tomate-0.65, sandía-0.95, melón-0.95, calabaza-0.95, zanahoria-0.00, cebolla-0.00, brócoli-0.00 y pepino-0.65).

Fuente: elaboración propia con datos del SIAP, Klein *et al.* (2007) y Giannini *et al.* (2015).

6.4.3.3 Oferta potencial de polinización⁵³

Existe evidencia que la creciente intensificación de las prácticas agrícolas y la reducción de los hábitats naturales de los polinizadores animales están ocasionando una disminución de la oferta en regiones específicas, que contrasta con el aumento global de cultivos que requieren de polinización animal (por ejemplo, aumento en la estructura y aumento de prácticas de monocultivo). La estimación de la oferta potencial de polinizadores animales (abejas y otros insectos) en las áreas agrícolas se realiza con base en el método de la vegetación y abundancia de los polinizadores animales desarrollado por Lonsdorf *et al.* (2009) y Kennedy *et al.* (2013). Este modelo busca predecir la abundancia y la diversidad de las abejas en referencia con el tipo de suelo (figura 6-20) y, a través de ello, predice la oferta potencial de polinización disponible en cada área de cultivo. Para ello, se utiliza la herramienta *InVest* del *Natural Capital Project* de la Universidad de Stanford, que permite estimar los índices de polinización potencial (oferta y abundancia de polinizadores) en todo el territorio en México.⁵⁴

Figura 6-20. Lógica del modelo de cobertura vegetal y abundancia de polinización



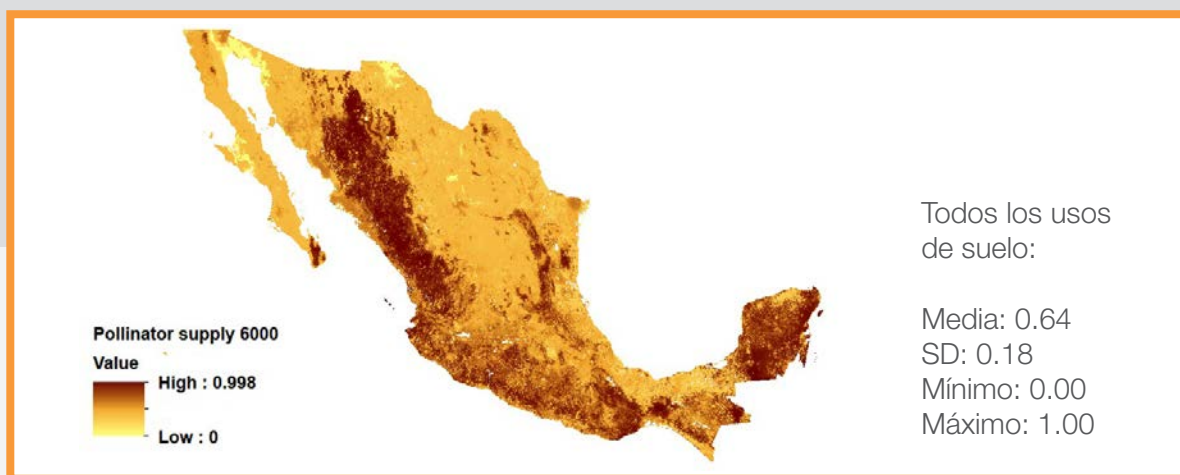
Fuente: elaboración propia.

⁵³ Servicio potencial de polinización del ecosistema.

⁵⁴ La herramienta *InVEST* se encuentra en Sharp *et al.* (2018) disponible en: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest-models/crop-pollination>.

El mapa 6-17 muestra el Índice de Oferta de Polinización Animal en México que sugiere una media nacional de oferta potencial de polinización de 0.64 con respecto a la demanda de polinización (mapa 6-18).

Mapa 6-17. Índice de Oferta de Polinización Animal Potencial



Fuente: elaboración propia con base en la CUSV serie VI (INEGI, 2019) y con la herramienta *InVest* disponible en <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/croppollination.html>

Mapa 6-18. Índice de Abundancia de Polinización Animal



Fuente: elaboración propia con base en la CUSV serie VI (INEGI, 2019) y con la herramienta *InVest* disponible en <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/croppollination.html>

Aplicando las tasas de dependencia de demanda de polinización potencial ajustadas por la oferta potencial agregada, se observa que el valor de la polinización fue de 32 277 millones de pesos en 2013, correspondiente a 7.74 % del valor de la producción agrícola en el mismo año (cuadro 6-18).

La contribución monetaria del servicio de polinización, derivado de la oferta de polinización potencial ajustada por la proximidad a los hábitats fue de 33 510 millones de pesos en 2013 y representó 0.21 % del PIB de ese año (cuadro 6-19).

La oferta potencial de la polinización animal en forma georreferenciada para los cultivos agrícolas se presenta en el mapa 6-19.

Cuadro 6-18 Valor monetario de la contribución de la oferta de polinización potencial a la producción agrícola

Periodo	Millones de pesos	Porcentaje del VBP	Porcentaje del PIB total
2013	32 277	7.74	0.20
Promedio: 2003-2018	31 962	8.15	0.21

Fuente: elaboración propia con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), Klein *et al.* (2007), Giannini *et al.* (2015) y simulaciones de la herramienta *InVest* disponible en <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/croppollination.html>.

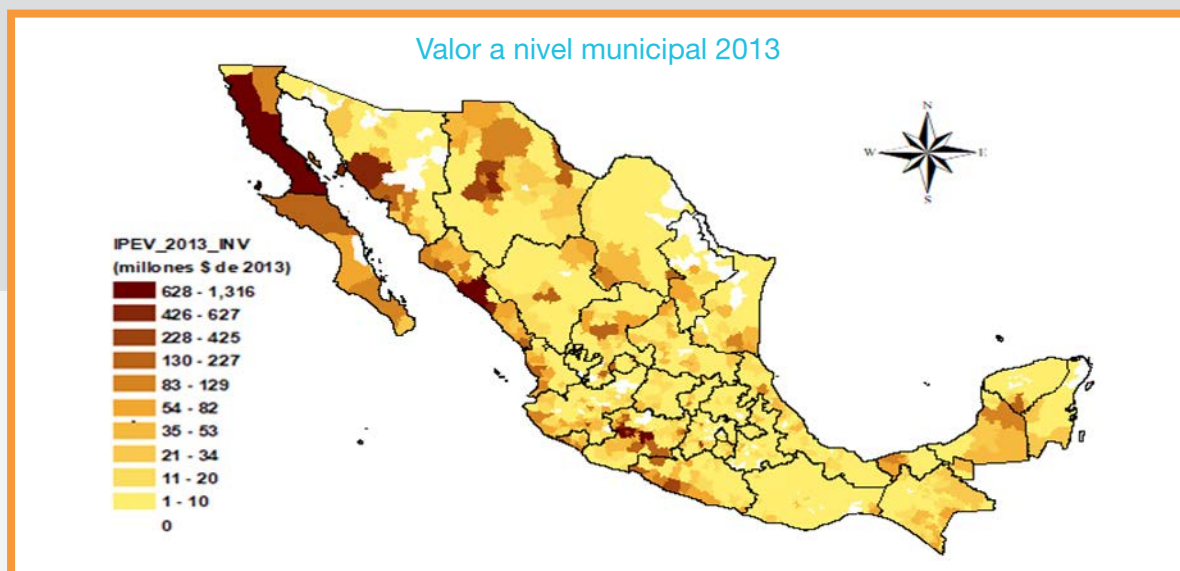
Cuadro 6-19. Valor de la contribución monetaria del servicio de polinización, ajustado por distancia, con base en la oferta potencial, 2003 y 2018

Periodo	Millones de pesos	Porcentaje del VBP	Porcentaje del PIB total
2013	33 510	8.03	0.21
2018	67 877	10.13	0.29
Promedio: 2003-2018	32 980	8.39	0.22

Nota: el valor de polinización a nivel municipal se ajustó utilizando el promedio de todos los valores de los píxeles en la figura 4.1 para cada uno de los municipios de México.

Fuente: elaboración propia con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), Klein *et al.* (2007), Giannini *et al.* (2015) y simulaciones de la herramienta *InVest* disponible en <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/croppollination.html>

Mapa 6-19. Valor de la contribución monetaria del servicio de polinización con base en la oferta potencial



Fuente: elaboración propia con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), Klein *et al.* (2007), Giannini *et al.* (2015) y simulaciones de la herramienta *InVEST* disponible en <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/croppollination.html>

6.4.3.4 La distancia y la contribución potencial del servicio de polinización a la producción agrícola: un análisis de consistencia con microdatos

La contribución de la polinización a la producción agrícola, incluyendo la distancia entre los hábitats de los polinizadores y las áreas de cultivos para atender el posible déficit de poliniza-

dores puede estimarse económicamente considerando una función de ingresos (por ejemplo, Winfree *et al.*, 2011) o, de manera similar, con un modelo Neo-Ricardiano (Mendelsohn *et al.*, 1994). La estimación del modelo econométrico, con base en la ENA 2014, muestra que existe una asociación significativa y no lineal entre el clima y los ingresos netos agrícolas (Mendelsohn *et al.*, 2009); las características del suelo mantienen una asociación significativa con los ingresos netos; los años de educación del productor se asocian, generalmente, con ingresos netos más altos; aquellas unidades de producción que cuentan con tractores, maquinaria y vehículos propios suelen tener ingresos netos superiores a las unidades de producción que no cuentan con ellos; la proximidad a los mercados y cuerpos de agua muestran que 1 kilómetro más alejado del mercado reduce el ingreso neto por hectárea; la asociación entre tierra cultivada e ingresos netos es sensible al tipo de cultivo; al disponer o no con un sistema de riego; donde se observa que 1 metro adicional de distancia entre el bosque y las tierras agrícolas reduce los ingresos netos en promedio 3.25 pesos de 2013 en el rango de 0 a 1 308 metros. Por otro lado, no se encuentra una asociación significativa entre la proximidad con el bosque entre 1 309 y 6 mil metros.

6.4.4 Conclusiones y comentarios generales

La evidencia disponible permite estimar que el valor monetario de la demanda potencial del servicio de polinización animal significa 12.09 % del valor de la producción agrícola en 2013, lo que representa, en promedio, 12.73 % de la producción agrícola. Las estimaciones con base en la ENA 2014 proveen resultados similares con un valor monetario de la demanda del servicio de polinización animal que representa 11.48 % de la producción agrícola en 2014. Asimismo, aplicando a nivel agregado la oferta potencial promedio de polinización animal para 2013, es de 7.74 % de la producción agrícola. Además, la contribución monetaria del servicio de polinización, derivado de la oferta de polinización ajustado por la proximidad a los hábitats en 2013, es de 32 277 millones de pesos equivalentes a 7.74 % del valor de la producción bruta agrícola (cuadro 6-20).

Cuadro 6-20. Valor de la contribución de la polinización animal en la producción agrícola como porcentaje del PIB

	Valor 2013	Valor 2018	Valor promedio 2003-2018 como porcentaje del PIB
Demanda potencial	0.31	0.435	0.331
Oferta potencial	0.20	0.279	0.212
Oferta potencial ajustada por distancia	0.21	0.289	0.218

Fuente: elaboración propia.

Estas diferencias entre la demanda y la oferta potenciales de polinización animal muestran los déficits de polinización en el país consecuencia del actual estilo de desarrollo agropecuario y sugieren las potenciales consecuencias de la pérdida del servicio de polinización. Se observa, además, que las formas y capacidad de apropiación de la contribución monetaria del servicio de polinización animal en la producción agrícola es diferenciada por tipo de productores y/o producción. Esto es, las tierras de riego suelen beneficiarse más de la proximidad a ciertos tipos de vegetación o hábitats de polinizadores animales que las áreas agrícolas de temporal. Este comportamiento entre la oferta y la demanda potencial de polinización se observa también por regiones del país, donde se refleja la importancia de la polinización en la producción agrícola en el centro y el oeste del país.

La contribución monetaria de los servicios de polinización de los ecosistemas muestra una volatilidad asociada, parcialmente, a modificaciones en la estructura de la producción agrícola. Por ejemplo, destaca la creciente relevancia económica de cultivos como el aguacate, que tienen una alta dependencia de polinización, asociado al consumo de guacamole en eventos como el *Super Bowl*. De este modo, el comportamiento del valor monetario del servicio de polinización tiene una alta dependencia, no lineal, con la evolución de la estructura de la producción agrícola y una independencia relativa de los flujos físicos.

Este valor monetario del servicio de regulación final de la polinización puede sustraerse del valor total agregado de la contribución de los servicios de los ecosistemas de la producción agrícola. Ello permite evitar una doble contabilidad y pasar de la contribución bruta de los SE a la contribución neta de los servicios de los ecosistemas (UN *et al.*, 2014, p. 52).

Este conjunto de resultados muestra que la pérdida de estos servicios de polinización animal tendría costos económicos significativos para la agricultura en México, con diversos efectos por tipo de productor (riego o temporal) y para la construcción de una agricultura sostenible (Hanley *et al.*, 2015).

6.4.4.1 Recomendaciones

- La relevancia de la polinización animal para los cultivos agrícolas sugiere la importancia de preservar los hábitats de los polinizadores animales. Ello requiere instrumentar una estrategia de polinización donde se consideren las consecuencias económicas, sociales y ambientales de preservar y potenciar la polinización. Ello será fundamental en el futuro de las actividades agrícolas.
- La contribución monetaria del servicio de polinización animal en la producción agrícola es diferenciada por tipo de productores y/o producción (por ejemplo, riego o temporal). Ello implica la necesidad de considerar las distintas consecuencias económicas y sociales de la polinización animal e incluir, por ejemplo, el servicio de polinización en la estrategia económica del sector agropecuario y en la estrategia social rural.
- La contribución monetaria de los servicios de polinización de los ecosistemas está en función de la evolución de un conjunto de variables económicas y sociales, como la estructura de la producción agrícola. Ello debe estar incorporado en el marco conceptual de la valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas.
- La valoración monetaria del servicio de regulación de la polinización está incluida en la valoración monetaria de los SE a los cultivos agrícolas por el método de la renta unitaria del recurso. En este sentido, su valoración monetaria independiente permite avanzar en la identificación y atribución de los factores que están incluidos en el residual obtenido por el método de la renta unitaria del recurso y pasar entonces de una valoración monetaria bruta a una valoración monetaria neta y evitar una doble contabilidad.
- La volatilidad del servicio de polinización animal debe estar incorporada al construir escenarios prospectivos.

6.4.4.2 Áreas de oportunidad

Es necesario identificar mejor la relación de cada uno de los polinizadores animales con las tasas de dependencia y la relación entre los diferentes polinizadores y sus hábitats a partir del análisis de las redes de interacciones multitróficas en distintos sistemas de polinización (naturales e inducidos).

6.5 Servicio de provisión y regulación del abastecimiento de agua

Mensajes clave

Los servicios de provisión, regulación y culturales de los recursos hídricos de los ecosistemas contribuyen, a través de diversos canales, a las actividades económicas y al bienestar de la población. Sin embargo, la diversidad de formas de servicio, los múltiples efectos y los procesos de retroalimentación de los servicios de los recursos hídricos dificultan la valoración monetaria. Así, estas estimaciones deben considerarse como preliminares y se requieren investigaciones adicionales para reducir los sesgos presentes con el fin de generar valores económicos que enriquezcan el análisis y la discusión.

El valor monetario del servicio ecosistémico de aprovisionamiento hídrico, estimado por el método del precio unitario de la renta del recurso, resultó en 1.95 y 1.72 pesos/m³ a partir de datos derivados del Sistema de Cuentas Nacionales (SCN) y del Sistema Automatizado de Información Censal (SAIC), respectivamente. Así, el valor monetario de la contribución de los recursos hídricos para el consumo de los hogares correspondió a 0.052 y 0.039 % del PIB de 2013 considerando las dos fuentes de información mencionadas. Para 2018, se estimaron los valores de 0.044 y 0.033 % del PIB de 2018, respectivamente.

A nivel municipal, el valor monetario de la contribución de los recursos hídricos para el suministro se estimó en 0.011 y 0.014 % de 2013 y en 0.010 y 0.012 % del PIB de 2018 considerando las dos fuentes de información disponibles.

Los costos anuales de reemplazo de aguas residuales municipales e industriales corresponden a 0.28 y 0.54 % del PIB de 2013 y a 0.25 y 0.49 % del PIB de 2017, respectivamente.

Los costos de reemplazo por región hidrológico-administrativa muestran que la mayor contribución monetaria de los servicios de los recursos hídricos de los ecosistemas a las actividades económicas y humanas se ubica en las zonas occidente y centro del país.

Este conjunto de resultados muestra la relevancia de los servicios hídricos de los ecosistemas para el consumo de agua en los hogares y el suministro municipal.

6.5.1 Introducción

Los ecosistemas contribuyen, a través de los recursos hídricos, con un conjunto de servicios de provisión, regulación y culturales esenciales para las actividades económicas y humanas. Disponer de una valoración monetaria de la contribución de los servicios de los recursos hídricos de los ecosistemas a las actividades económicas y humanas resulta fundamental para garantizar su preservación y uso sustentable, su aprovechamiento eficiente económicamente y su incorporación en los análisis de costo-beneficio y en las estrategias de política pública. Sin embargo, la estimación del valor monetario de cada uno de estos servicios es en extremo compleja; en este sentido, el objetivo de este capítulo es estimar el valor monetario de los servicios hídricos de los ecosistemas para el consumo de los hogares (residencial) y para el suministro municipal. Esta valoración monetaria es, desde luego, preliminar y se requiere continuar realizando investigaciones adicionales que enriquezcan el análisis y la discusión.

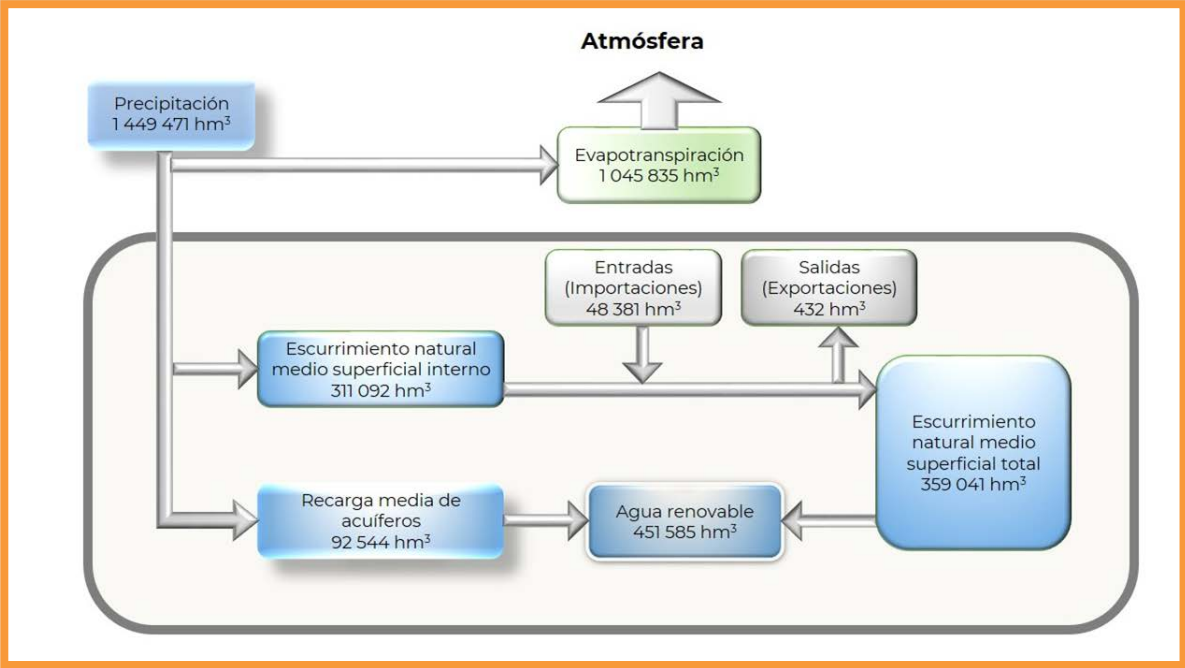
6.5.2 Hechos estilizados y flujos físicos en recursos hídricos

La precipitación media anual en México en 2017 fue, aproximadamente, de 1 449 471 hm³ de agua, de donde 1 045 835 hm³ regresaron a la atmósfera por evapotranspiración y 311 092 hm³ correspondieron al escurrimiento natural medio superficial interno más otras filtraciones al subsuelo (acuíferos) (CONAGUA, 2018) (figura 6-21).

De esta precipitación pluvial, aproximadamente 1 449 471 millones de m³ de agua, se estima que 72.1 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera, 21.4 % escurre por los ríos o arroyos y 6.4 % se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos (CONAGUA, 2018). Estos recursos hídricos permiten un uso consuntivo del agua de 87 842 hm³, de donde se destina 76 % al sector agrícola, 14.4 % al abastecimiento público, 4.9 % a la industria autoabastecida y 4.7 % a la energía eléctrica, excluyendo hidroelectricidad. Esta oferta hídrica proviene de: 60.9 % de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos) y 39.1 % de subterráneas (acuíferos), y es utilizada en diversas actividades económicas y humanas, donde el volumen total concesionado de agua para estas corresponde para usos consuntivos⁵⁵ a 87 842 hm³ y para no

55 Usos consuntivos se refiere a la diferencia entre volumen extraído y el descargado al realizar una actividad (CONAGUA, 2018, p. 74).

Figura 6-21. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México



Fuente: CONAGUA (2018).

Cuadro 6-21, Usos consuntivos y no consuntivos del agua agregados por actividades, sectores y fuentes, 2017

Continúa

Consumos agrupados	Superficial (miles de hm³)	Subterráneo (miles de hm³)	Volumen total concesionado (hm³)	Porcentajes
Agrícola	42.47	24.32	66 799	76.0
Abastecimiento público	5.25	7.38	12 628	14.4
Industrial integrado	2.04	2.23	4 267	4.9

Cuadro 6-21. Usos consuntivos y no consuntivos del agua agregados por actividades, sectores y fuentes, 2017

Concluye

Consumos agrupados	Superficial (miles de hm ³)	Subterráneo (miles de hm ³)	Volumen total concesionado (hm ³)	Porcentajes
Electricidad excluyendo hidroelectricidad	3.70	0.45	4 147	4.7
Subtotal consuntivo	53.46	34.39	87 842	100.0
			Uso agrupado no consuntivo	
Hidroeléctricas			183 066	
Conservación ecológica			9.46	
Subtotal no consuntivo			183 075	
Total			270 917	

Nota: las sumas son aproximadas y están redondeadas.

Fuente: CONAGUA (2018).

consuntivos⁵⁶ a 183 075 hm³ (cuadro 6-21).⁵⁷ Estos recursos hídricos muestran una distribución heterogénea por regiones y estratos socioeconómicos.

Los recursos hídricos de los ecosistemas proveen un conjunto de servicios de provisión, de regulación y culturales para las actividades económicas y humanas que se asocian a las características (por ejemplo, extensión y condición) de los ecosistemas y al clima (UN, 2019, p. 146; UN-SEEA-WATER, 2012a). Esto es, la cobertura del tipo de vegetación del suelo incide en los patrones de infiltración, retención y almacenamiento, evapotranspiración y de calidad del agua. De este modo, los tipos de ecosistemas condicionan la calidad y la magnitud de la oferta de agua que proviene de los ecosistemas.

56 Este es el consumo donde la actividad no modifica el volumen de agua (CONAGUA, 2018, p. 74).

57 Esta información está disponible por regiones hidrológicas (CONAGUA, 2018, pp. 80-81).

6.5.3 Datos y métodos

6.5.3.1 Fuentes de información

La información utilizada corresponde a:

1. Sistema de Cuentas Nacionales (INEGI, 2013 y varios años), de donde se obtiene para la rama 2221 *Captación, tratamiento y suministro de agua*⁵⁸ el valor agregado bruto al que se extraen las remuneraciones, los impuestos netos para obtener el excedente bruto de operación (EBO). Posteriormente, al EBO se le sustrae el consumo de capital fijo. La información del consumo de capital fijo de la rama 2221 se obtiene de la información disponible para el consumo de capital fijo del subsector 222 al que se aplica un factor de ajuste, de acuerdo con la participación de la rama 2221 en el EBO del subsector 222.
2. Censos Económicos del 2018 de la rama 2221 *Captación, tratamiento y suministro de agua*, de donde se obtiene el valor agregado bruto al que se extraen las remuneraciones totales, la formación bruta de capital y la depreciación de los activos fijos.
3. Las estimaciones de los costos defensivos se obtienen del Programa Hídrico Regional. Visión 2030 por Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) (CONAGUA, 2012). Estas estimaciones, elaboradas por la CONAGUA (2018 y 2012⁵⁹), permiten identificar los costos de tratamiento de las aguas residuales municipales (público e industrial) por cuenca para disponer de ríos limpios a 2030, donde el costo requerido por cada m³ adicional de agua es la suma anual de las inversiones requeridas descontadas por una tasa de 12 % basado en el modelo ATP. SGP-CONAGUA. 2010 y donde el costo depende del volumen tratado (Prospectiva, Programa Hídrico Regional. Visión 2030 por RHA). Estos costos para el tratamiento de aguas de origen municipal e industrial se estiman⁶⁰ con base en el Índice de Costos de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, basado en las curvas de costos estimadas por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y en un estudio de costos sobre el tratamiento y reúso del agua en la industria petroquímica (CONAGUA, 2018). Estas curvas identifican el gasto promedio/marginal de tratamiento del agua residual municipal e industrial incluyendo los costos anualizados de las inversiones y gastos operativos y de mantenimiento requeridos para cerrar la brecha de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales hasta

58 Incluye hogares, industria y comercio.

59 Programa Hídrico Regional. Visión 2030 por Regiones Hidrológicas Administrativas (CONAGUA, 2012).

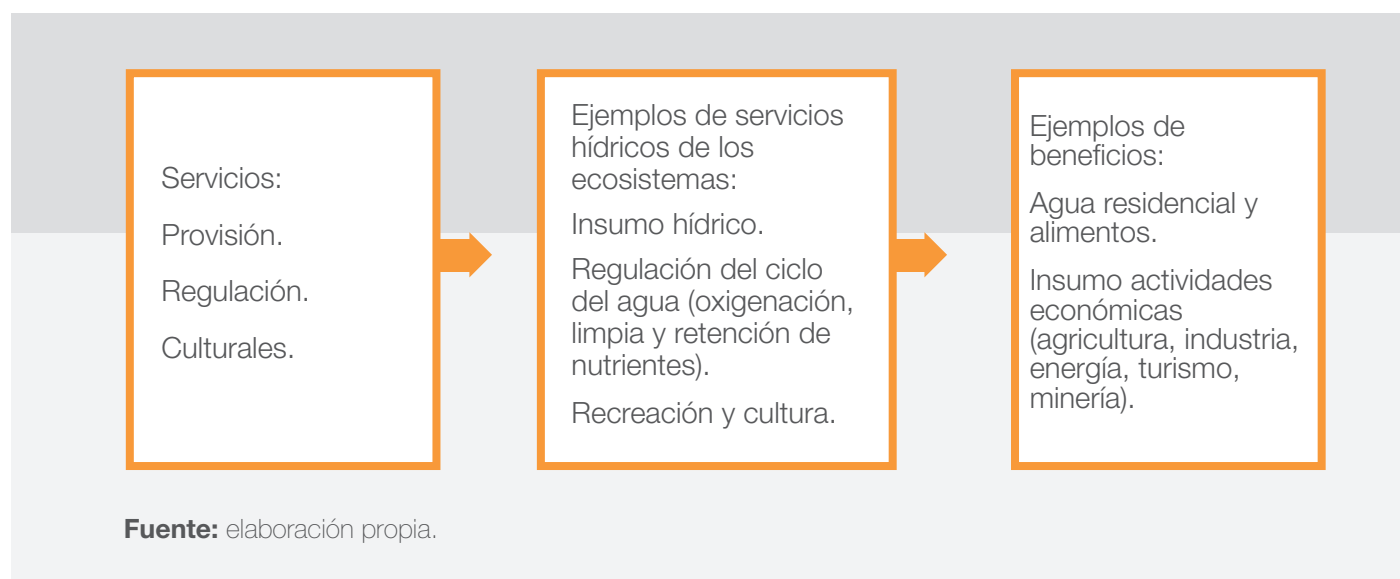
60 Ello debido al lugar de ubicación de la planta o de las condiciones regionales específicas.

4. 2030 para disponer de agua en los ríos que cumpla con la normatividad del mínimo requerido por la NOM-001 SEMARNAT-1996 (CONAGUA, 2012; Prospectiva RHA III, p. 72) y donde el costo de tratamiento corresponde a la suma de los costos totales por m³ (CONAGUA, 2012; Prospectiva RHA III, p. 69; Mantilla *et al.*, 2002).
5. Para aproximar el rendimiento hídrico georreferenciado, se utiliza la plataforma *InVEST* (Sharp *et al.*, 2018). El modelo de rendimiento hídrico de *InVEST* estima la contribución relativa de diferentes usos de suelo. Para las simulaciones en la plataforma, se usa el *raster* de precipitación y el de evapotranspiración publicados en Fick y Hijmans (2017). Para la profundidad de la capa de restricción de la raíz, se emplea la base de datos global de suelos disponible en la *Soil and Terrain Database (SOTER) Programme*. Para el contenido de agua disponible de la planta, se utilizan rangos por textura de suelo de acuerdo con Sharma (2019). Para el *raster* de tipos de vegetación, se usa la *Carta de uso de suelo y vegetación. Serie VI* del INEGI (2016). Para los mapas de cuencas y subcuencas, se utilizan los archivos *shape* publicados por la CONAGUA. Se usa un parámetro $Z = 13.99$ para simular la distribución estacional de la precipitación.

6.5.3.2 Método de valoración monetaria del servicio de provisión de agua

Existen, desde luego, diversos métodos para la valoración monetaria de los servicios de provisión y regulación de los recursos hídricos de los ecosistemas para las actividades económicas y humanas (figura 6-22) (UN, 2012a; UN-SEEAWATER, 2012a, p. 134; Champ *et al.*, 2017; Remme *et al.*, 2015; Horlings *et al.*, 2019).

En este estudio se aplicaron diversos métodos para estimar el valor monetario de los recursos hídricos.

Figura 6-22. Servicios de provisión, regulación y cultura de los recursos hídricos

6.5.3.2.1 Método del precio unitario de la renta del recurso

Este se basa en el supuesto de que todos los mercados son competitivos⁶¹ con la excepción del mercado del agua.⁶² De este modo, el valor total de producción del agua equivale al valor del producto del agua menos el excedente de operación bruto y menos el consumo de capital fijo (depreciación) y las ganancias de los activos producidos y los salarios de los empleados por cuenta propia (cuadro 6-22) (UN-SEA-EEA, 2012a; UN-SEEA-WATER, 2012b, pp. 38 y 135; INEGI, 2020).

61 Las empresas maximizan sus ganancias en el punto donde los ingresos netos marginales son iguales a los costos marginales.

62 De este modo, el valor estimado corresponde al valor monetario del agua que puede ajustarse corrigiendo las distorsiones en los precios de mercado de los insumos o los costos de oportunidad de todos los insumos (UN-SEEA-WATER, 2012a, p. 139).

Cuadro 6-22. Renta del recurso hídrico

Valor total del producto
- Consumo intermedio
- Sueldos y salarios
- Impuestos netos
Igual a excedente de operación
- Consumo de capital fijo (depreciación)
- Ganancias de los activos producidos
- Sueldos y salarios de los empleados por cuenta propia
Igual a renta del recurso
= agotamiento + ingreso neto de los activos ambientales.

Fuente: Horlings *et al.* (2019).

6.5.3.2.2 Método de costos defensivos o de tratamiento o reemplazo

Este se basa en las preferencias de los individuos que están dispuestos a modificar su conducta o en gastar en evitar consecuencias negativas derivadas de la degradación de los ecosistemas o al menos en modificar las probabilidades de ocurrencia de efectos nocivos (OCDE, 2018; UN, 2014). En este sentido, se analiza el deseo de pagar por mejores condiciones ambientales. El método estima el valor de los servicios del ecosistema basado en los costos de los daños debido a la pérdida de estos servicios y calcula el deseo de pagar de los individuos por una mejor salud o evitar consecuencias negativas en salud (Farber *et al.*, 2002).

El método de costos de tratamiento estima los costos de reparación de daños del servicio ecosistémico (UN, 2014, p. 119). Sin embargo, esta opción no necesariamente refleja los cambios en los servicios de los ecosistemas (Barbier, 2013) y requiere el cumplimiento de algunas condiciones, como que el consumidor no pague más que el valor del sustituto (Champ *et al.*, 2017).

6.5.4 Resultados

6.5.4.1 Valoración monetaria de los servicios hídricos agregada

La estimación de valor monetario del agua para consumo de los hogares y suministro municipal (incluye consumo de hogares, industria y servicios) por el método de precio unitario del recurso se realiza con base en la información del Sistema de Cuentas Nacionales (SCN) y a la derivada de los Censos Económicos (CE). Ello busca identificar un rango de valores del servicio hídrico de los ecosistemas. Las estimaciones, sintetizadas en el cuadro 6-23, indican un valor monetario del servicio hídrico de los organismos operadores de 34.05 miles de millones de pesos a partir de datos del SCN y de 24.84 miles de millones de pesos mexicanos con base en la información de los CE a 2018. Estos valores permiten construir un rango del valor monetario del servicio hídrico de los ecosistemas para el consumo de los hogares y municipal.

El valor monetario estimado del servicio hídrico de los ecosistemas es de 1.95 y 1.72 pesos por m³ con base en los datos del Sistema de Cuentas Nacionales y del Sistema Automatizado de Información Censal, respectivamente. Así, el valor monetario de la contribución de los recursos hídricos al consumo de los hogares corresponde a 8.39 y 6.35 miles de millones de pesos de 2013, equivalentes a 0.052 y 0.039 % del PIB nacional de 2013 y a 0.044 y 0.033 % del PIB nacional de 2018. Asimismo, el valor monetario de la contribución de los recursos hídricos para el suministro municipal corresponde a 1.84 y 2.25 miles de millones de pesos de 2013, que equivalen a 0.011 y 0.014 % del PIB nacional de 2013 y a 0.010 y 0.012 % del PIB nacional de 2018 (cuadro 6-24). Además, las estimaciones con información del SCN y el SAIC indican un valor monetario⁶³ de 1.47 y 2.5 pesos/m³, respectivamente, que corresponde a 0.047 y 0.069 % del PIB de 2013 para el consumo de los hogares y 0.010 y 0.025 % para el consumo municipal.

63 El alto valor de 2.5 pesos/m³ derivado del censo en 2013 se asocia a la caída de las remuneraciones.

Cuadro 6-23. Estimaciones del valor monetario del servicio hídrico con base en el método de la renta unitaria del recurso

Descripción (año)	2018
Excedente bruto de operación subsector 222	51 939.770
Consumo de capital fijo subsector 222	16 385.374
Depreciación	1 361.843
Renta neta (millones de pesos corrientes)	34 046.080
Estimación de la renta neta de agua residencial con información de la rama 2221 <i>Captación, tratamiento y suministro de agua de los Censos Económicos del INEGI</i>	
Descripción (año)	2018
Valor agregado bruto (VAB) (millones de pesos corrientes)	53 064.102
Total de remuneraciones (millones de pesos corrientes)	23 585.395
Formación bruta de capital (millones de pesos corrientes)	50 073.900
Depreciación de los activos fijos (millones de pesos corrientes)	4 637.023
Renta neta o residual (millones de pesos corrientes)	24 841.684

Fuente: elaboración propia con datos de la Cuenta de Bienes y Servicios del Sistema de Cuentas Nacionales y el Sistema Automatizado de Información Censal.

Cuadro 6-24. Valor monetario del servicio hídrico de los ecosistemas para el suministro de los hogares y municipal, 2018

	Valor monetario de los organismos operadores (miles de millones de pesos)	Oferta total de agua (millones de m³)	Precio de la renta unitaria del recurso	Valor monetario (miles de millones de pesos)	Valor (porcentaje del PIB nacional de 2018)	Valor (porcentaje del PIB nacional de 2013)
Hogares (SCN)	22.878	5 246	1.95	8.391	0.044	0.052
Hogares (CE)	15.020	4 500	1.722	6.350	0.033	0.039
Suministro municipal (SCN)	5.023	1 152	1.95	1.844	0.010	0.011
Suministro municipal (CE)	2.253	1 598	1.722	2.253	0.012	0.014

Fuente: elaboración propia.

6.5.4.2 Contribución georreferenciada del valor monetario de los servicios hídricos al consumo de los hogares y suministro municipal

La contribución monetaria de los SE por región hidrológico-administrativa (RHA) para consumo de los hogares para 2017 se presenta en el cuadro 6-25 y mapas 6-20 y 6-21, donde se observa una importante heterogeneidad geográfica y donde el mayor valor monetario se concentra en las RHA VI, VIII y IX.

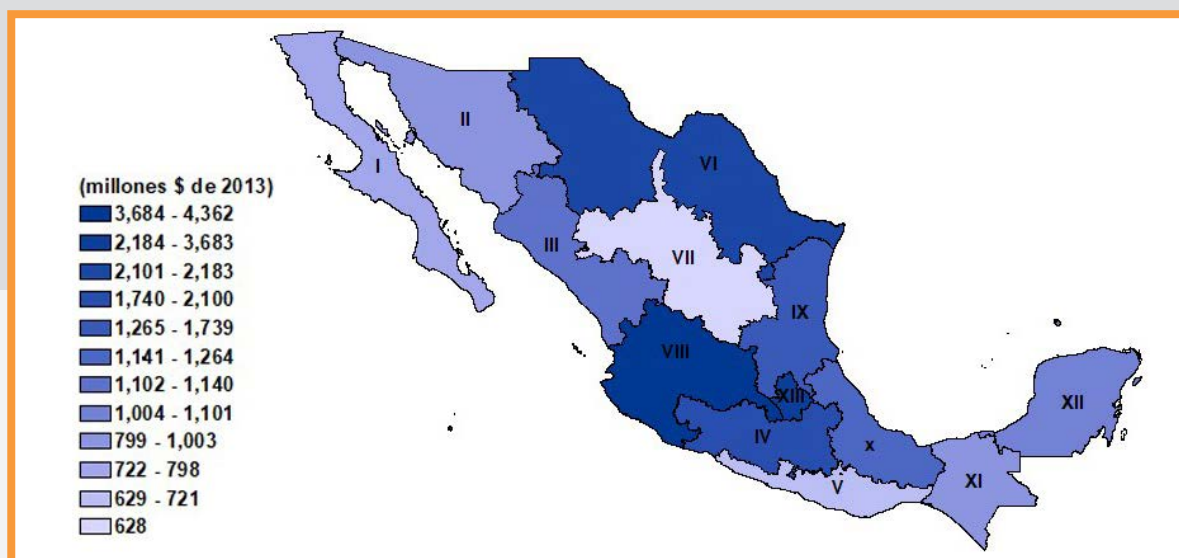
Cuadro 6-25. Valor monetario de los servicios hídricos de los ecosistemas para consumo de los hogares por región hidrológica

Re- gión	Abastecimiento público 2017 (hm ³ /año)			Valor (millones de pesos) \$1.72/m ³				Valor (millones de pesos) \$1.95/m ³			
	Sup	Sub	Total	Sup	Sub	Total	% del PIB de 2013	Sup	Sub	Total	% del PIB de 2013
I	123	341	464	212	587	798	0.0049	240	665	905	0.0056
II	291	292	583	501	502	1 003	0.0062	567	569	1 137	0.0070
III	324	339	663	557	583	1 140	0.0070	632	661	1 293	0.0079
IV	591	630	1 221	1 017	1 084	2 100	0.0129	1 152	1 229	2 381	0.0146
V	188	231	419	323	397	721	0.0044	367	450	817	0.0050
VI	570	699	1 269	980	1 202	2 183	0.0134	1 112	1 363	2 475	0.0152
VII	12	353	365	21	607	628	0.0039	23	688	712	0.0044
VIII	1 057	1 479	2 536	1 818	2 544	4 362	0.0268	2 061	2 884	4 945	0.0304
IX	854	157	1 011	1 469	270	1 739	0.0107	1 665	306	1 971	0.0121
X	446	289	735	767	497	1 264	0.0078	870	564	1 433	0.0088
XI	437	146	583	752	251	1 003	0.0062	852	285	1 137	0.0070
XII	0	640	640	1	1 101	1 101	0.0068	1	1 248	1 249	0.0077
XIII	358	1 783	2 141	616	3 067	3 683	0.0226	698	3 477	4 175	0.0256
Total	5 251	7 379	12 630	9 032	12 692	21 724	0.1335	10 240	14 389	24 629	0.1513

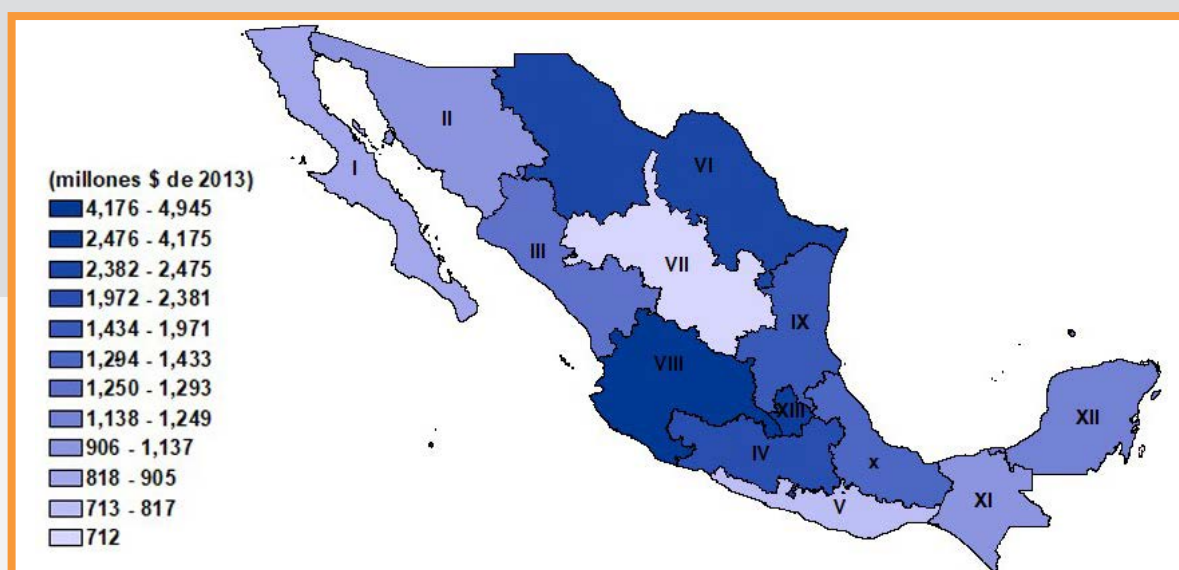
Sup: agua superficial; Sub: agua subterránea.

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2018).

Mapa 6-20. Valor monetario del servicio hídrico al consumo residencial (millones de pesos-\$1.72/m³)



Mapa 6-21. Valor monetario del servicio de consumo residencial (millones de pesos-\$1.95/m³)



6.5.4.3 El método de costo de reemplazo del tratamiento del recurso hídrico para ríos limpios de aguas municipales e industriales

Estima el valor monetario del servicio de regulación intermedio de filtración natural de agua subterránea para consumo residencial y/o municipal (Horlings *et al.*, 2019a y 2019b; ONU, 2021). Estimaciones para México, elaboradas por la CONAGUA (2018 y 2012⁶⁴) permiten identificar los costos de tratamiento de las aguas residuales municipales (público e industriales) por cuenca para disponer de ríos limpios a 2030 que cumplan con la normatividad del mínimo requerido por la NOM-001 SEMARNAT-1996 (CONAGUA, 2012; Prospectiva RHA III, p. 72) y donde el costo de tratamiento corresponde a la suma de los costos totales por m³ (CONAGUA, 2012; Prospectiva RHA III, p. 69; Mantilla *et al.*, 2002). Los costos anuales de reemplazo de aguas residuales municipales a 2030 e industriales corresponden a 0.25 y 0.49 % del PIB de 2017, respectivamente.

Las estimaciones generales y georreferenciadas por RHA de estos costos de tratamiento de las aguas residuales municipales se sintetizan en los mapas 6-22 y 6-23. Estas muestran que el valor monetario de los servicios hídricos de los ecosistemas se concentra en el centro y occidente del país.

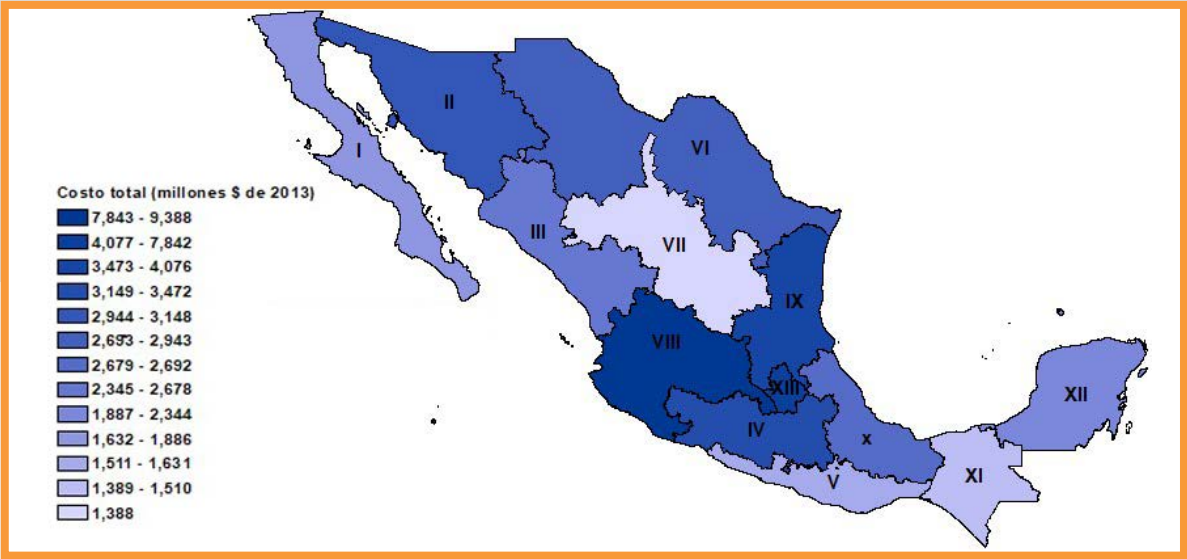
64 Programa Hídrico Regional. Visión 2030 por RHA (CONAGUA, 2012).

Cuadro 6-26. Costos de reemplazo de aguas residuales municipales e industriales totales y por RHA

RHA	Costo de proveer de agua limpia a ríos derivada de aguas residuales (\$/m³)	Costo de reemplazo de volumen de agua para consumo industrial (millones de pesos)			Costo de reemplazo de volumen de agua para consumo industrial (porcentaje del PIB de 2017)		
		Superficial	Subterránea	Total	Superficial	Subterránea	Total
I	25.00	1 800.0	625.0	2 425.0	0.008	0.003	0.011
II	25.00	200.0	2 750.0	2 950.0	0.001	0.013	0.013
III	25.00	975.0	550.0	1 525.0	0.004	0.003	0.007
IV	25.00	6 725.0	2 325.0	9 050.0	0.031	0.011	0.041
V	25.00	25.0	500.0	525.0	0.000	0.002	0.002
VI	25.00	350.0	5 200.0	5 550.0	0.002	0.024	0.025
VII	25.00	25.0	2 700.0	2 725.0	0.000	0.012	0.012
VIII	25.00	1 650.0	12 875.0	14 525.0	0.008	0.059	0.066
IX	25.00	10 825.0	1 025.0	11 850.0	0.049	0.005	0.054
X	25.00	26 100.0	3 900.0	30 000.0	0.119	0.018	0.137
XI	25.00	1 425.0	1 900.0	3 325.0	0.006	0.009	0.015
XII	25.00	0.0	17 275.0	17 275.0	0.000	0.079	0.079
XIII	25.00	775.0	4 150.0	4 925.0	0.004	0.019	0.022
Total		50 875.0	55 775.0	106 650.0	0.232	0.254	0.486
Total (\$ y PIB de 2013)		41 687.3	45 702.4	87 389.8	0.256	0.281	0.537

Fuente: elaboración propia con base en los programas hídricos regionales: visión 2030 para las 13 regiones hídricas y en el documento *Estadísticas del agua en México, 2018* (con datos para 2017).

Mapa 6-22. Costo de reemplazo de volumen de agua para consumo residencial, 2018 (millones de pesos)



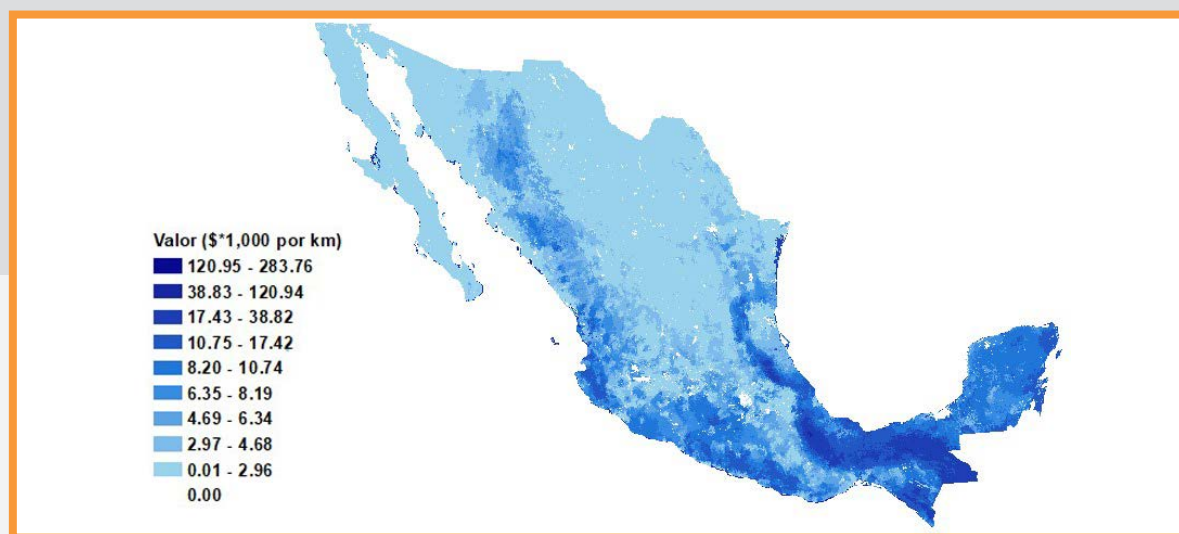
Mapa 6-23. Costo de reemplazo de volumen de agua para consumo residencial, 2013 (millones de pesos)



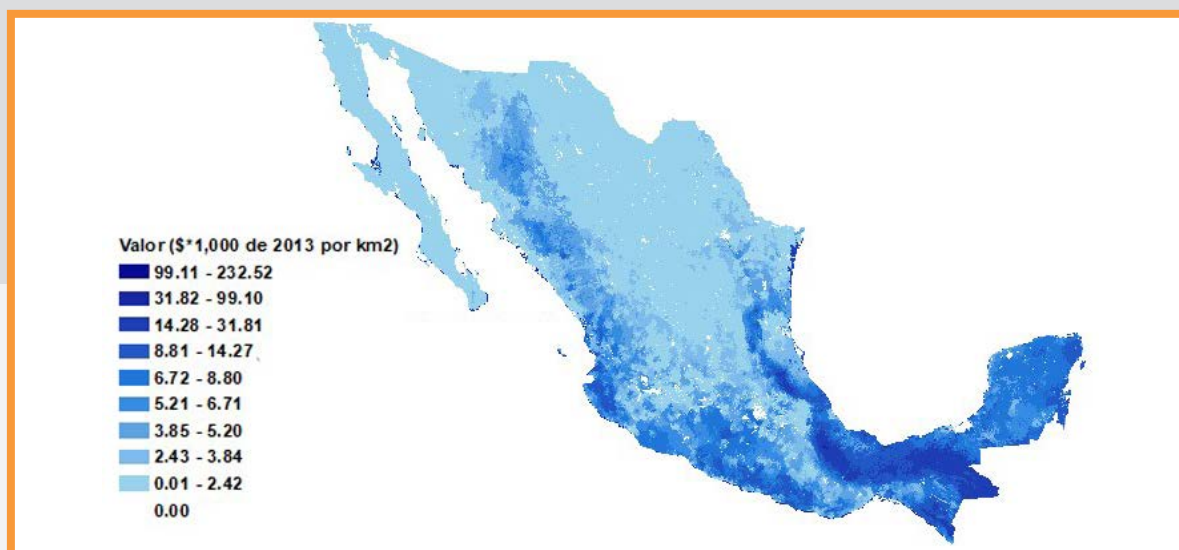
6.5.4.4 Valor monetario del servicio hídrico en consumo de hogares y suministro municipal de los servicios de los ecosistemas

La provisión de agua está condicionada por el tipo de uso y cobertura de suelo y vegetación que incide sobre los patrones de evapotranspiración e infiltración y retención de agua alterando los ciclos hidrológicos y, por lo tanto, la oferta hídrica. En este sentido, la oferta de agua asociada a los distintos ecosistemas permite estimar el rendimiento del agua de los ecosistemas (*water yields*), que equivale al agua que proviene de la precipitación, ajustada por un parámetro que identifica la fracción del agua que proviene de la precipitación y que no regresa a la atmósfera por evaporación o transpiración, y que fue entonces capturada por los ecosistemas asociado a diferentes tipos de suelo (ONU, 2021). Así, el valor monetario del servicio hídrico de los ecosistemas se ajusta a la oferta de los ecosistemas por tipo de suelo y vegetación, con base en la *Carta de uso de suelo y vegetación. Serie VI* que publica el INEGI (2016). Las estimaciones del rendimiento hídrico (mm) se presentan en los mapas 6-24 y 6-25.

Mapa 6-24. Valor monetario del servicio hídrico por tipo de vegetación, 2018
(miles de pesos por Km²)



Mapa 6-25 Valor monetario del servicio hídrico por tipo de vegetación, 2013 (miles de pesos por km²)



Nota: para calcular el valor del servicio hídrico se utiliza un precio por m³ de 1.95 pesos.

Fuente: elaboración propia con información de *InVEST* (Sharp *et al.*, 2018), *Carta de uso de suelo y vegetación. Serie VI* (INEGI, 2020), datos de clima de Fick y Hijmans (2017).

6.5.5 Conclusiones y recomendaciones

Los servicios de provisión, regulación y culturales de los recursos hídricos de los ecosistemas contribuyen, a través de diversos canales, a las actividades económicas y al bienestar de la población. Sin embargo, la diversidad de formas de servicio, los múltiples efectos y los procesos de retroalimentación de los servicios de los recursos hídricos dificultan la valoración monetaria de los servicios que proporcionan los recursos hídricos. Así, estas estimaciones deben considerarse como preliminares; se requieren investigaciones adicionales para reducir los sesgos presentes con el fin de generar valores económicos que enriquezcan el análisis y la discusión.

El valor monetario de los servicios de los recursos hídricos de los ecosistemas con base en el método del precio unitario de la renta para el consumo de los hogares y el suministro municipal y el de costo de reemplazo para el suministro municipal indican que:

- El valor monetario de la contribución de los recursos hídricos para el consumo de los hogares corresponde a 0.052 y 0.039 % del PIB de 2013 y a 0.044 y 0.033 % del PIB de 2018.
- El valor monetario de la contribución de los recursos hídricos para el suministro municipal corresponde a 0.011 y 0.014 % de 2013 y a 0.010 y 0.012 % del PIB de 2018.
- Los costos anuales de reemplazo de aguas residuales municipales e industriales corresponden a 0.28 y 0.54 % del PIB de 2013 y a 0.25 y 0.49 % del PIB de 2017.
- Los costos de reemplazo georreferenciados muestran que la mayor contribución monetaria de los servicios de los recursos hídricos de los ecosistemas a las actividades económicas y humanas se ubica en occidente y centro del país (RHA VI, VIII y IX).

Este conjunto de resultados muestra la relevancia de los servicios hídricos de los ecosistemas para el consumo de agua en los hogares y el suministro municipal.

6.5.5.1 Recomendaciones

- La valoración monetaria de la contribución de los SE a la oferta de agua para el consumo de los hogares y municipal es relevante. En este sentido, es importante considerar las interrelaciones que se establecen entre la oferta de agua, su precio, su costo, su consumo y la preservación de los ecosistemas e incorporarlas en el diseño económico, social y ambiental de la política hídrica.
- Por otro lado, se considera necesario realizar más estimaciones sobre el valor monetario de los SE con diferentes métodos para realizar diversos análisis de consistencia.

6.5.5.2 Áreas de oportunidad

- La estimación del valor monetario de los SE basado en el método de la renta unitaria del recurso contiene áreas de oportunidad para poder desagregar los distintos factores que componen el residual calculado.
- La estimación del valor monetario de los servicios de los ecosistemas de los recursos hídricos está limitada por la disponibilidad de información.

6.6 Servicios culturales en la economía del turismo de naturaleza

Mensajes clave

Analizando la información disponible sobre el turismo de naturaleza⁶⁵ en las áreas naturales protegidas (ANP) es posible observar que se trata de una actividad de creciente importancia en la dinámica económica y social en México.

Las estimaciones del valor monetario permiten observar una contribución al producto de las 15 ANP consideradas como prioritarias por su interés turístico y biológico de 36 021 millones de pesos que representan 0.22 % del PIB de 2013.

Las estimaciones, realizadas con un metaanálisis y una metarregresión, indican que el valor monetario del turismo de naturaleza en las ANP seleccionadas se aproxima a 221 582 millones de pesos, lo que representa 1.36 % del PIB de 2013. Estos valores monetarios, derivados del metaanálisis, resultaron mayores a los valores monetarios contables, lo cual sugiere que existen aún oportunidades importantes para mejorar la medición de los valores del turismo de naturaleza y de la importancia que tienen otros servicios ecosistémicos en las ANP.

6.6.1 Introducción

Durante las últimas décadas, las actividades turísticas en México han registrado un dinamismo económico a través de tasas crecientes de empleo y consumo de bienes y servicios relacionados con el esparcimiento, y un aumento de los niveles de ingreso en general asociados con las industrias del hospedaje, alimentos y actividades recreativas que se llevan a cabo en los diversos segmentos de turismo, como de sol y playa, cultural, de negocios, de aventura y de naturaleza o turismo ecológico. En este contexto, existe una creciente demanda de infor-

⁶⁵ La economía del turismo de naturaleza se refiere a la riqueza generada en sitios con vocación turística, donde la protección de la frontera ambiental se encuentra regulada, por lo que el impacto ambiental es nulo o mínimo y la actividad económica turística puede prevalecer, por ejemplo, incluye lo relacionado con las visitas a las áreas naturales protegidas.

mación relacionada con el turismo de naturaleza en México y en los servicios que ofrecen los ecosistemas, ya que se considera que esta vertiente también genera dinamismo a la economía de las regiones, al mismo tiempo que permite preservar los activos naturales.

La estimación de los SE en el turismo de naturaleza requiere disponer de información sólida y sistematizada (encuestas nacionales, censos o cuentas nacionales) a nivel nacional que incorporen la dimensión ambiental y de los servicios de los ecosistemas. Si bien existe información para algunos sitios emblemáticos, no es representativa a nivel país.

De este modo, el objetivo de este capítulo es estimar el valor monetario de la economía del turismo de naturaleza en las ANP (con base en una aproximación del producto relacionado con el turismo de estas y en un metaanálisis sobre el valor monetario de los servicios turísticos en las áreas naturales protegidas seleccionadas).

6.6.2 Hechos estilizados

Las actividades turísticas en México tienen una contribución relevante al PIB y al empleo e inciden, por su ubicación geográfica, en el desarrollo regional y, de forma significativa y creciente, en el turismo sustentable. Así, se observa que el PIB del sector turismo en 2018 representó 8.7 % del PIB nacional⁶⁶ y el sector turismo generó 2.3 millones de puestos de trabajo remunerados, que representaron 6 % del total de las ocupaciones remuneradas a nivel nacional en 2018 (INEGI, 2018). El gasto de consumo, en ese mismo año, realizado por los turistas dentro del país (consumo interior) fue de 3 222 433⁶⁷ millones de pesos corrientes, donde el consumo correspondiente al turismo de residentes en México (consumo interno) representó 82.7 % y el gasto de los visitantes extranjeros (consumo receptivo) significó 17.3 % (cuadro 6-27). El gasto turístico interno fue realizado por motivos vacacionales (30.4 %), excursiones (12.9 %), negocios (5.6 %) y gastos previos (11 %) y el del turismo internacional correspondió a vacaciones (69.6 %), otras causas de viaje (16.3 %), excursionistas (7.5 %) y por motivos de negocios (6.6 %) (INEGI, 2018). Además, se estimó un número de visitantes extranjeros de 41.4 millones, que representaron un ingreso de divisas de 288 128 millones de pesos (INEGI, 2018; SECTUR, 2018 y otros años).

66 Esto es, 1 941 343 pesos corrientes o 1 540 868 millones de pesos constantes de 2013 (SECTUR, 2018).

67 Que representa 2 555 957 millones de pesos constantes de 2013.

Cuadro 6-27. Consumo turístico por origen, 2018*

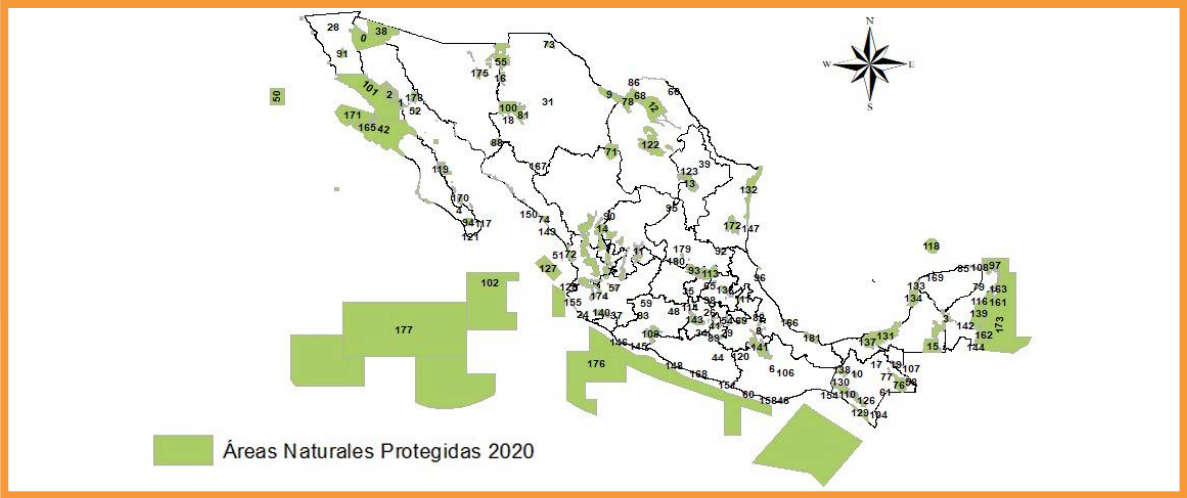
Concepto	Monto en pesos corrientes	Porcentaje	Porcentaje	Monto en precios constantes de 2013
Total	3 495 233	100.0		2 828 767
1. Consumo interior	3 222 433	92.2	100.0	2 555 967
1.1 Consumo interno	2 666 482	76.3	82.7	2 111 998
1.2 Consumo receptivo	555 951	15.9	17.3	443 970
2. Consumo emisor	272 800	7.8		272 800

* PIB de 22 191 164 millones de pesos (INEGI, 2018).

Fuente: elaboración propia, INEGI (2018).

En este contexto, se observa que una proporción del gasto total de los turistas nacionales y extranjeros corresponde al turismo de naturaleza. La economía del turismo de naturaleza tiene como uno de sus fundamentos a las áreas naturales protegidas. Actualmente, existen 182 ANP de carácter federal con 90 838 011 hectáreas y donde se incluyen 21 379 398 hectáreas de superficie terrestre protegida (10.88 % de la extensión terrestre del país) y 69 458 613 hectáreas de superficie marina (22.05 % de la extensión marina del territorio nacional) (página de la CONANP) (mapa 6-26).

Mapa 6-26. Áreas naturales protegidas



Fuente: elaboración propia con datos de la CONANP (182 ANP).

6.6.3 Datos y métodos

6.6.3.1 Fuentes de información

Las fuentes de información para el análisis de los SE del turismo de naturaleza corresponden a:

1. En colaboración con la Secretaría de Turismo y la CONANP se identificaron 15 ANP a nivel federal con vocación turística evidente.
2. Se construyen 15 polígonos tipo *buffer* que abarcan el área de influencia⁶⁸ en torno de las ANP seleccionadas con potencial turístico. Estos se estimaron, con base en el módulo turístico de los Censos Económicos 2014, considerando el gasto turístico potencial al interior y alrededor de las ANP, que se infiere es derivado por la visita a dicha zona de interés y que se relaciona entonces con el producto en transporte de pasajeros; restaurantes, bares y centros nocturnos; alojamiento; agencias de viajes y otros servicios de reserva; comercio; servicios culturales; servicios deportivos y recreativos; así como otros (incluyen los servicios profesionales, casas de cambio, entre otros).
3. La información utilizada correspondiente a las ANP y su zona de influencia proviene de los establecimientos de 2013 en valores corrientes de las *Estadísticas de turismo con base en los resultados de los Censos Económicos 2014* y los polígonos de influencia de las ANP de interés, que se construyen a partir del estudio de las características de cada una de ellas considerando las actividades turísticas que se realizan y la proximidad geográfica de los establecimientos relacionados con el turismo.
4. Se construyó una base de datos con estudios que realizan una valoración monetaria de los SE en áreas naturales para utilizar en el metaanálisis.

68 La extensión del área de influencia económica de las ANP varía de un caso a otro en función de la distribución geográfica de los establecimientos económicos.

6.6.3.2 Método de valoración monetaria del turismo de naturaleza en áreas naturales protegidas

Los SE contribuyen al turismo de naturaleza de diferentes formas (figura 6-23). La estimación del conjunto del valor económico de los recursos naturales y ambientales que se encuentran en las áreas naturales protegidas puede servir como insumo para la evaluación de proyectos o de políticas ambientales sectoriales.

Figura 6-23. Servicios de los ecosistemas al turismo de naturaleza



La estimación de los SE del turismo de naturaleza en las áreas naturales protegidas se realiza a través de:

1. Método del gasto y producto en la ANP. La identificación del valor agregado relacionado con la economía de naturaleza en las 15 áreas naturales protegidas seleccionadas se basa en construir 15 polígonos tipo buffer que abarcan el área de influencia⁶⁹ en tor-

⁶⁹ La extensión del área de influencia económica de las ANP varía de un caso a otro en función de la distribución geográfica de los establecimientos económicos.

no de las ANP seleccionadas con potencial turístico. Estos se estimaron, con base en el módulo turístico de los Censos Económicos 2014, considerando el gasto/producto turístico potencial al interior y alrededor de las ANP, que se infiere es derivado por la visita a dicha zona de interés y que se relaciona entonces con el producto en transporte de pasajeros; restaurantes, bares y centros nocturnos; alojamiento; agencias de viajes y otros servicios de reserva; comercio; servicios culturales; servicios deportivos y recreativos; así como otros (incluyen los servicios profesionales, casas de cambio, entre otros).

2. Metaanálisis y metarregresión. Un análisis preliminar del valor monetario del turismo de naturaleza basado en las áreas naturales protegidas seleccionadas. Este puede obtenerse con base en un metaanálisis (Lipsey y Wilson, 2001). De esta forma, es posible transferir los resultados de un sector o región a otra área de análisis a través de estimar un promedio ponderado⁷⁰ de los efectos identificados en diversos estudios (Glass *et al.*, 1981).

6.6.4 Resultados

6.6.4.1 Valoración monetaria del turismo de naturaleza en las ANP

Los SE proveen de atributos y atractivos naturales que contribuyen a la oferta turística, lo que genera beneficios recreativos, de diversión, culturales e incluso de salud y, al mismo tiempo, permite evitar ruido, contaminación atmosférica y congestión vial. De este modo, los SE generan beneficios económicos al turismo de naturaleza al combinarse con el capital humano físico, trabajo, infraestructura y otros insumos.

70 La media ponderada de los estudios le asigna, normalmente, mayor peso a los estudios más precisos.

6.6.4.2 Valoración monetaria de las ANP por contribución al producto

La estimación del valor bruto de las actividades relacionadas con la economía del turismo de naturaleza con base en la información de las 15 ANP con vocación turística y del módulo turístico de los Censos Económicos 2014 se sintetiza en el cuadro 6-28.

Cuadro 6-28. Valor bruto de la producción (VBP) de actividades relacionadas con el turismo de naturaleza alrededor de las ANP

ANP	Descripción	VBP (miles de pesos)	VBP % del PIB 2013	VAB (miles pesos)	VAB % del PIB 2013
1	RB El Vizcaíno	245 754	0.00151	131 222.2	0.00081
2	PN Bahía de Loreto	169 507	0.00104	72 285.8	0.00044
3	PN Cascada de Bassaseachic	1 420	0.00001	576.9	0.00000
4	PN Cumbres de Monterrey	23 039 124	0.14154	10 895 520.0	0.06694
5	PN Isla Isabel	0	0.00000	0.0	0.00000
6	PN Islas Marietas	497 539	0.00306	172 725.8	0.00106
7	RB Mariposa Monarca	1 291 171	0.00793	269 618.9	0.00166
8	RB Tehuacán - Cuicatlán	2 641 689	0.01623	1 358 620.4	0.00835
9	PN Pico de Orizaba	3 906 343	0.02400	1 915 800.4	0.01177
10	PN Huatulco	306 540	0.00188	167 592.5	0.00103
11	PN Lagunas de Montebello	745 053	0.00458	414 259.6	0.00255
12	RB Calakmul	169 003	0.00104	109 148.1	0.00067
13	RB Banco Chichorro	1 846 549	0.01134	910 658.4	0.00559
14	PN Tulum	740 499	0.00455	187 383.5	0.00115
15	PN Arrecife Alacranes	420 755	0.00258	233 953.0	0.00144
	Total	36 020 943	0.22130	16 839 365.5	0.10345

Nota: incluye transporte de pasajeros; restaurantes, bares y centros nocturnos; alojamiento; agencias de viajes y otros servicios de reserva; comercio; servicios culturales; servicios deportivos y recreativos; así como otros (incluyen los servicios profesionales, casas de cambio, entre otros).

De este modo, el valor monetario de la contribución al producto en la economía de naturaleza en las ANP seleccionadas es de 36 020.94 millones de pesos, que representan 0.22 % del PIB de 2013. Este valor monetario de las ANP puede, además, asociarse al tipo de suelo y vegetación. La ubicación geográfica de las ANP se representa en el mapa 6-27.

Mapa 6-27. Valor monetario georreferenciado de las ANP (millones de pesos)



Fuente: elaboración propia.

6.6.4.3 Metaanálisis del valor monetario turístico de las áreas naturales protegidas

El metaanálisis indica que el valor monetario de una hectárea incluyendo todos los SE es de 303 680 pesos y las estimaciones con una metarregresión muestran que el turismo de naturaleza aumenta el valor monetario de las áreas naturales protegidas.

Las 15 ANP con vocación turística incluyen 4 724 637 hectáreas (CONANP, 2020) y donde el metaanálisis estima el valor por hectárea de las ANP en 46 899 pesos, mismo que aumenta a 110 848 pesos considerando su uso para actividades de caza y pesca,⁷¹ y se incrementa a 159 168 pesos al ser utilizadas para actividades turísticas y recreativas. De este modo, el valor monetario turístico de las 15 ANP seleccionadas es de 221.58 miles de millones de pesos de 2013⁷² que representan 1.36 % del PIB de 2013 (cuadro 6-29). Este valor es mayor que el estimado previamente y sugiere que existen aún oportunidades importantes en el turismo ambiental o de naturaleza en México y deja ver la importancia que tienen otros SE en las ANP.

Cuadro 6-29. Valor monetario del turismo de naturaleza en las áreas naturales protegidas

Número de ANP	Área (hectáreas)	Valor (millones de dólares)	Valor (% del PIB de 2013)
15 ANP	4 724 637	17 311	1.361

Nota: se utiliza un tipo de cambio promedio de 12.80 pesos mexicanos por dólar estadounidense en 2013.
Fuente: estimación propia con base en los resultados del metaanálisis.

La expresión geográfica del valor monetario de turismo sustentable, basado en el metaanálisis, atendiendo a las 15 ANP estudiadas se presenta en la mapa 6-28 a precios de 2013.

71 Este valor es similar al estimado para el área de Cozumel que incluye al conjunto de los servicios de los ecosistemas, lo que refleja, parcialmente, que en este caso se estima un valor monetario asociado a la economía del bienestar (ECOVALOR, 2021).
72 Tomando en cuenta un valor por hectárea de 3 664 dólares y un tipo de cambio promedio de 12.80 pesos mexicanos por dólar estadounidense en 2013.

Mapa 6-28. Valor monetario del turismo ambiental o de naturaleza de las 15 ANP (millones de pesos)



6.6.5 Conclusiones y comentarios generales

La evidencia disponible muestra que el turismo de naturaleza es una actividad de creciente importancia en la dinámica económica y social en México, y donde uno de sus componentes fundamentales corresponde a las áreas naturales protegidas.

Las estimaciones del valor monetario de los SE al turismo de naturaleza de las ANP tienen las siguientes consideraciones:

- Las estimaciones del valor monetario permiten apreciar una contribución al producto de las 15 ANP consideradas como prioritarias por su interés turístico y biológico de 36 021 millones de pesos que representan 0.22 % del PIB de 2013.
- Las estimaciones, realizadas con un metaanálisis y una metarregresión, indican que el valor monetario del turismo de naturaleza en las ANP se aproxima a 221 582 millones de pesos, lo que representa 1.36 % del PIB de 2013. Estos valores monetarios, derivados del metaanálisis, resultaron mayores a los valores monetarios contables (UN, 2021), lo cual sugiere que existen aún oportunidades importantes en el turismo de naturaleza y deja ver la importancia que tienen otros SE en las ANP.

6.6.5.1 Áreas de oportunidad

- El ejercicio se puede complementar y actualizar en la medida que se generen más fuentes de información o se integren mayores criterios en los reactivos de recolección de información.
- Estas estimaciones son preliminares, ya que existen otros elementos que deben incluirse en una valoración más completa del turismo de naturaleza.

6.7 Valoración monetaria agregada de los servicios de los ecosistemas.

Mensajes clave

La valoración monetaria de los SE a nivel nacional muestra la contribución, en unidades monetarias, de los SE a las actividades económicas y humanas en México. En este sentido, la preservación de los ecosistemas y sus servicios resulta fundamental para promover un desarrollo sustentable. Sin embargo, la valoración monetaria de los SE a nivel nacional requiere del desarrollo de más estudios y métodos complementarios; de este modo, esta valoración monetaria debe tomarse como resultados preliminares. Más aún, esta considera una serie de servicios ecosistémicos, sin embargo, existen aún más servicios que deberán incorporarse en siguientes etapas.

Además, existe una relación no lineal y de doble causalidad entre los flujos físicos y los monetarios de los SE y una independencia relativa de la valoración monetaria de los ecosistemas en referencia con los flujos físicos que puede, incluso, influir en la condición y extensión de los ecosistemas.

Estos resultados pueden apoyar en la toma de decisiones e incorporarse en el diseño de políticas agropecuaria, ambiental, climática y social, así como fomentar la discusión sobre mecanismos de transición hacia a un desarrollo sostenible.

6.7.1 Introducción

Los SE contribuyen, a través de diversos canales, a la realización de las actividades económicas y humanas. Sin embargo, las contribuciones de los SE no tienen asignado un valor monetario real de mercado y, por lo tanto, no se contabilizan en el conjunto de las cuentas nacionales. Esta falta de un valor monetario reconocido en el mercado se traduce en un uso ineficiente y de sobreexplotación de los SE y en la degradación de los ecosistemas y dificulta su incorporación en las estrategias de política pública y en los análisis y el comportamiento de los agentes económicos.

El objetivo de esta sección es presentar una síntesis de las estimaciones de la valoración monetaria de las contribuciones de los SE a los cultivos agrícolas, del almacenamiento y secuestro de carbono, de la polinización animal, de la oferta de agua al consumo residencial y municipal y al turismo de naturaleza en las áreas naturales protegidas seleccionadas. Desde luego, estas estimaciones son preliminares y solo incluyen a un grupo parcial de servicios.

6.7.2 Resultados

Una síntesis de la valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas en México se presenta en el cuadro 6-30. Así, la contribución bruta de los SE (agrícola, carbono, polinización, agua residencial y turismo de naturaleza) de los ecosistemas representa 3.11 % del PIB de 2013.

Cuadro 6-30. Valor monetario bruto de los servicios de los ecosistemas

Continúa

Tipo de servicio	Método de valoración	Precios (millones de pesos)	Porcentaje del PIB en 2013	Porcentaje del PIB promedio 1993-2018
Servicios de provisión	1. Agricultura (R)	163 667	1.01	0.99
	2. Agricultura (RN)	110 723	0.68	0.59
	1. Arroz (R)	285	0.0017	0.0033
	2. Arroz (RN)	190	0.0012	0.0021
	2.1. Frijol (R)	5 147	0.0316	0.0306
	2.2. Frijol (RN)	3 508	0.0216	0.0184
	3.1. Maíz (R)	26 762	0.1644	0.1407
	3.2. Maíz (RN)	17 071	0.1049	0.0721
	4.1. Trigo (R)	5 765	0.0354	0.0255
	4.2. Trigo (RN)	4 197	0.0258	0.0155

Cuadro 6-30. Valor monetario bruto de los servicios de los ecosistemas**Concluye**

Tipo de servicio	Método de valoración	Precios (millones de pesos)	Porcentaje del PIB en 2013	Porcentaje del PIB promedio 1993-2018
	5.1. Sorgo (R)	7 313	0.0449	0.0348
	5.2. Sorgo (RN)	4 887	0.0300	0.0185
	6.1 Soya (R)	561	0.0034	0.0021
	6.2. Soya (RN)	368	0.0023	0.0011
	Microdatos	187 062	1.11	
Servicios de regulación	7.3. Carbono en biomasa aérea	50 213	0.3085	
	7.2. Carbono orgánico en suelos (COS)	216 041		
	7.3. Total almacenamiento y secuestro de carbono	266 254	1.3273	
			1.636	
	8. Polinización potencial:			
	8.1. Demanda	50 432	0.310	0.331
	8.2. Oferta	32 277	0.198	0.212
	8.3. Oferta ajustada por distancia	33 510	0.206	0.218
	9. Oferta agua hogares y municipal			
	9.1. Renta neta hogares	8 391	0.052	
	9.2. Renta neta municipal	1 844	0.011	
	9.3. Costos de reemplazo	44 996	0.276	
Servicios culturales	10. Áreas naturales protegidas (ANP).			
	10.1. Valoración del producto.	36 021	0.2213	
	10.2. Metaanálisis	221 582	1.361	
Total 1. Valor bruto con renta agrícola	Agricultura (renta (R)) + total almacenamiento y secuestro de carbono + polinización (oferta) + agua residencial + ANP (producto)	506 610	3.112	
Total 2. Valor bruto con renta neta agrícola	Agricultura (rendimiento neto (RN)) + total almacenamiento y secuestro de carbono + polinización (oferta) + agua residencial + ANP (producto)	453 666	2.787	

Nota: la oferta de agua para consumo de los hogares y municipal incluye servicios de regulación y provisión; los totales representan una estimación bruta, ya que existe doble contabilidad (por ejemplo, SE agrícolas y polinización); Total 1: SE agrícolas (renta) 163 667 millones de pesos, almacenamiento y secuestro de carbono 266 254 millones de pesos, polinización (oferta) 32 277 millones de pesos, agua (consumo residencial) 8 391 millones de pesos, turismo de naturaleza (producto) 36 021 millones de pesos; Total 2: SE agrícolas (renta neta) \$110 723, almacenamiento y secuestro de carbono \$266 254, polinización (oferta) \$32 277, agua (consumo residencial) \$8 391, turismo de naturaleza (producto) \$36 021; la renta neta para hogares se calcula con un precio de 1.95 pesos por m³ y con base en información del Sistema de Cuentas Nacionales.

Fuente: elaboración propia.

La relevancia de los distintos servicios de los ecosistemas se presenta en las figuras 6-24 y 6-25.

Figura 6-24. Contribución monetaria bruta de los servicios de provisión, regulación y culturales de los ecosistemas (% del PIB de 2013)

Figura 6-24(a). Renta agrícola, carbono, agua residencial y turismo (% del PIB de 2013)

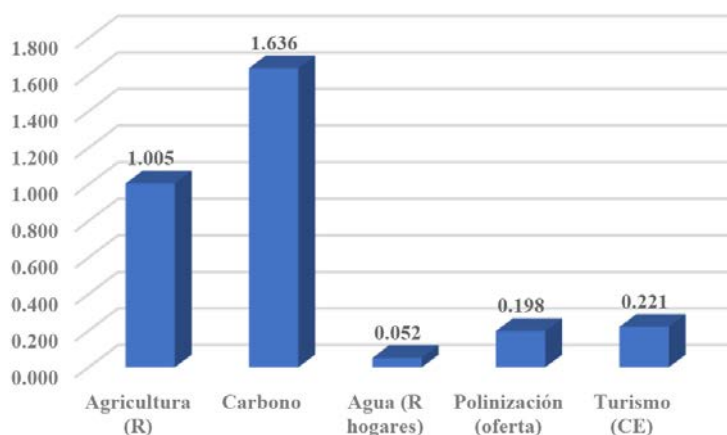
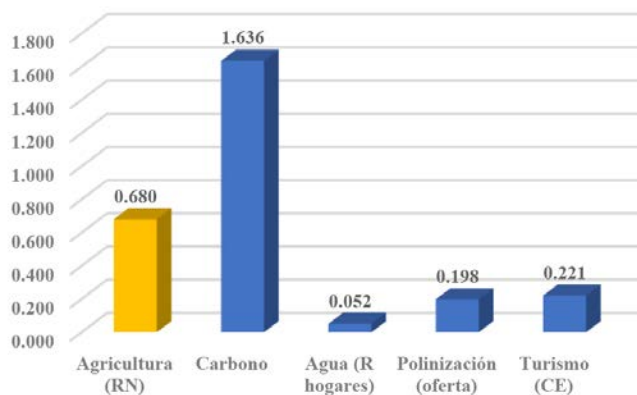


Figura 6-24(b). Rendimiento neto agrícola, carbono, agua residencial y turismo (% del PIB de 2013)



Fuente: elaboración propia con datos de los ejercicios de valoración.

Figura 6-25. Participación porcentual de los servicios de provisión, regulación y culturales en la provisión agregada de servicios de los ecosistemas

Figura 6-25(a). Renta agrícola, carbono, agua residencial y turismo (% del PIB de 2013)

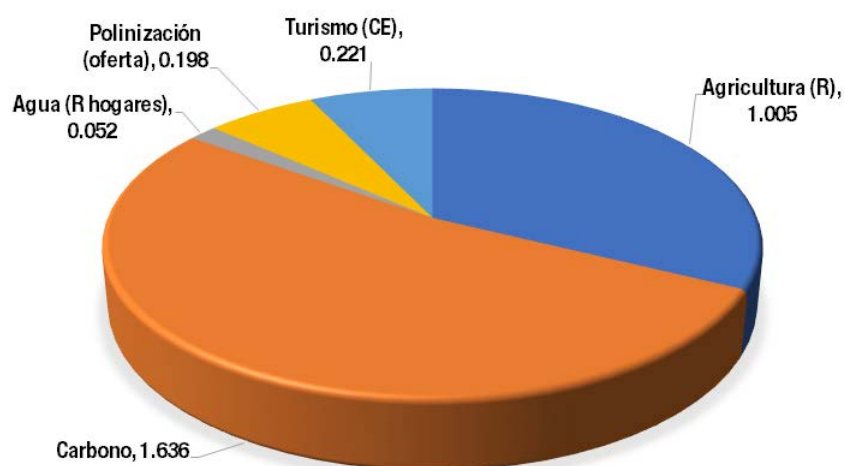
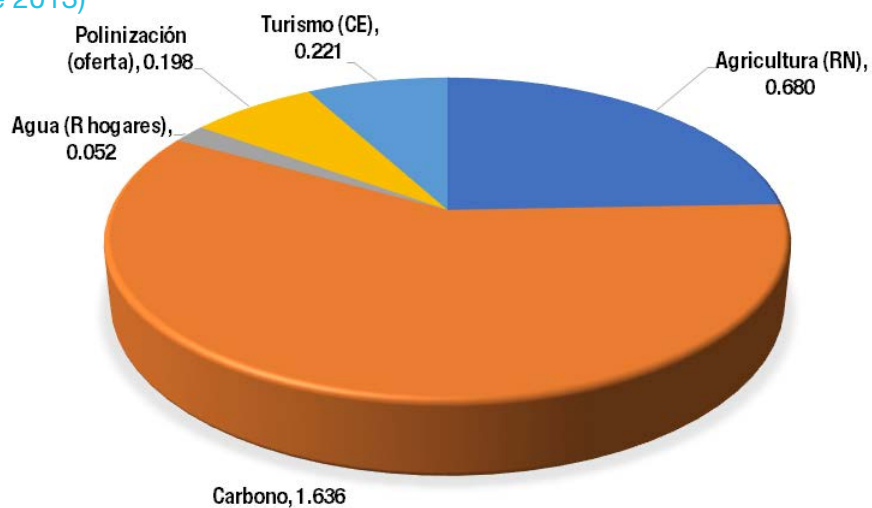


Figura 6-25(b). Rendimiento neto agrícola, carbono, agua residencial y turismo (% del PIB de 2013)



Nota: la oferta de agua para consumo de los hogares incluye servicios de regulación y provisión.

Fuente: elaboración propia.

La evidencia georreferenciada de los SE sugiere que existe una expresión espacial heterogénea. Esto es, se observa que: i) la provisión a los cultivos agrícolas se concentra en el centro y noroeste del país, pero con diferencias por cultivos; ii) que el almacenamiento y secuestro de carbono se concentra en el sur y noroeste; iii) la polinización tiene mayor valor en los cultivos del norte y noroeste, especialmente, en Baja California, Baja California Sur y Sinaloa; iv) para el servicio hídrico para el consumo de los hogares, este se concentra en el sur y sureste; y v) en el caso del turismo, la distribución espacial del valor de este servicio está sujeta a la ubicación de las áreas naturales protegidas con vocación turística.

6.7.3 Cuadros de oferta y utilización de los servicios de los ecosistemas en México

Estos se presentan en los cuadros 6-31 y 6-32. Los cuadros se construyeron con base en el valor monetario de los servicios de los ecosistemas.

Cuadro 6-31. Valor monetario de los servicios de los ecosistemas. Cuadro de oferta

	Economía						Medio ambiente						Total		
	Sector primario (agri-cultura)	Sector secundario	Sector terciario (turismo)	Hogares	Gobierno	Resto del mundo	Agricultura	Bosques (primaria)	Selvas (primaria)	Matorrales (primaria)	Otras áreas forestales (primaria)	Vegetación secundaria	Otros usos de suelo	Total (millones \$ de 2013)	Total (% del PIB de 2013)
Cultivos (total)*							163 666.51							163 666.51	1.0055
Maíz grano							26 762.22							26 762.22	0.1644
Frijol							5 146.91							5 146.91	0.0316
Trigo grano							5 765.07							5 765.07	0.0354
Sorgo							7 312.92							7 312.92	0.0449
Soya							560.96							560.96	0.0034
Arroz							284.50							284.50	0.0017
Otros cultivos							117 833.94							117 833.94	0.7239
Carbono (total)							49 116.27	68 707.53	54 871.00	29 277.50	16 537.96	42 802.72	4 941.61	266 254.57	1.6358
Biomasa								15 277.49	7 762.95	107.73	607.42	26 457.74		50 213.33	0.3085
Suelos							49 116.27	53 430.04	47 108.04	29 169.77	15 930.54	16 344.98	4 941.61	216 041.24	1.3273
Polinización (total)							6 415.28	909.16	2 086.18	8 305.23	14 560.93			32 276.79	0.1983
Agua (total)							1 438.09	1 093.24	776.77	511.70	1 842.63	2 609.68	118.45	8 390.57	0.0515
Turismo (total)							1 283.34	12 429.57	1 073.21	9 310.22	2 146.01	6 234.59	3 544.00	36 020.94	0.2213
Total (millones de pesos de 2013-incluye polinización)							221 919.49	83 139.51	58 807.16	47 404.65	35 087.52	51 646.99	8 604.06	506 609.38	3.1124
Total (% del PIB de 2013-incluye polinización)							1.3634	0.5108	0.3613	0.2912	0.2156	0.3173	0.0529	3.1124	

* El valor monetario es el bruto. Para obtener el neto, es necesario sustraer el valor monetario del servicio de regulación de la polinización. Se utiliza el valor de la polinización de 2018 en precios de 2013 debido a que el ejercicio de georreferenciación con InVEST se llevó a cabo para 2018 por disponibilidad de información para su calibración.

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6-32. Valor monetario de los servicios de los ecosistemas. Cuadro de utilización

	Economía						Medio ambiente						Total		
	Sector primario (agricultura)	Sector secundario	Sector terciario (turismo)	Hogares	Gobierno	Resto del mundo	Agricultura	Bosques (primaria)	Selvas (primaria)	Matorrales (primaria)	Otras áreas forestales (primaria)	Vegetación secundaria	Otros usos de suelo	Total (millones \$ de 2013)	Total (% del PIB de 2013)
Cultivos (total)*	163 666.51													163 666.51	1.0055
Maíz grano	26 762.22													26 762.22	0.1644
Frijol	5 146.91													5 146.91	0.0316
Trigo grano	5 765.07													5 765.07	0.0354
Sorgo	7 312.92													7 312.92	0.0449
Soya	560.96													560.96	0.0034
Arroz	284.50													284.50	0.0017
Otros cultivos	117 833.94													117 833.94	0.7239
Carbono (total)					266 254.57									266 254.57	1.6358
Biomasa					50 213.33									50 213.33	0.3085
Suelos					216 041.24									216 041.24	1.3273
Polinización (total)							32 276.79							32 276.79	0.1983
Agua (total)		8 390.57												8 390.57	0.0515
Turismo (total)			36 020.94											36 020.94	0.2213
	163 666.51	0.00	36 020.94	8 390.57		266 254.57	32 276.79							506 609.38	3.1124

* El valor monetario es el bruto. Para obtener el neto, es necesario sustraer el valor monetario del servicio de regulación de la polinización. Se utiliza el valor de la polinización de 2018 en precios de 2013 debido a que el ejercicio de georreferenciación con *InVEST* se llevó a cabo para 2018. Polinización es un servicio intermedio y, por lo tanto, reportado en agricultura.

Fuente: elaboración propia.

6.8 Conclusiones y recomendaciones

La valoración de los SE requiere de una cantidad considerable de datos físicos. Se recomienda que las cuentas físicas de los servicios ecosistémicos, que son espacialmente explícitos, se compilen antes de iniciar con la valoración económica, de acuerdo con las recomendaciones del SEEA EA.

Se utilizaron varios métodos para estimar los valores de cambio. Se recomienda que se lleve a cabo un análisis a profundidad de los métodos utilizados con actores interesados con el objetivo de obtener un consenso y acordar la compilación regular de los servicios ecosistémicos seleccionados.

Este ejercicio identificó la necesidad de mejorar los datos que sirven de entrada a los modelos biofísicos y a las técnicas de valoración.

Se recomienda explorar a fondo el vínculo entre la provisión de SE con la extensión y condición para obtener una medida de la capacidad de los servicios de los ecosistemas. Para lo anterior, se requiere comenzar con alinear las clasificaciones entre los datos físicos y los monetarios como un primer paso para la generación de información integrada, así como asegurar y fortalecer las acciones necesarias que harán que el conjunto de datos para realizar la integración entre las cuentas tenga características geoespaciales estandarizadas y extendidas en el tiempo.

El ejercicio de valoración demostró la necesidad de trabajar en conjunto con los expertos en economía ambiental, así como con aquellos que están compilando datos básicos que sirven como insumo en los modelos económicos. Se recomienda la necesidad de continuar los trabajos del grupo interinstitucional específico de sobrevaloración económica.

La valoración monetaria de los ecosistemas puede ser vista como un instrumento que permite identificar la contribución de los servicios ecosistémicos a las actividades económicas y bienestar humano. Esta proporciona información para ayudar en el diseño integral de instrumentos de política económico-ambiental que permitan una distribución eficiente del presupuesto y el manejo eficiente de los ecosistemas.

La base de la valoración económica requirió del continuo análisis de propuestas probadas en ejercicios similares al que hemos desarrollado en México, por lo que se han intercambiado, en esta etapa del proyecto, buenas prácticas con países como Reino Unido, Australia, Holanda y Canadá, entre otros. La riqueza de esta práctica redundó en la discusión sobre la selección y aplicación de técnicas de valoración económica, así como en la discusión de los resultados logrados, observando grandes similitudes entre los países, como el caso del valor de los servicios ecosistémicos hacia los cultivos agrícolas (incluido el valor de la polinización desarrollado en el proyecto de México). Asimismo, se destaca el intercambio de buenas

prácticas en el *United Nations Committee of Experts on Environmental Economic Accounting*, que permitió orientar el desarrollo de cálculos, como la oferta de polinizadores considerando la distancia existente entre los cultivos y el hábitat de los polinizadores, mediante modelos biofísicos como *InVEST* (valoración integrada de los servicios y compensaciones de los ecosistemas), que es un conjunto de modelos utilizados para mapear y valorar los bienes y servicios de la naturaleza que sustentan y satisfacen la vida humana.

Es importante destacar que las posibilidades de valorar los servicios ecosistémicos dependen totalmente de la disponibilidad de datos físicos provenientes de las cuentas de extensión y condición y, sobre todo, de las cuentas físicas de servicios ecosistémicos como también de modelos. Al interior del país se tiene un esquema de trabajo transversal que, desde el inicio del proyecto, ha venido acompañando el desarrollo de las cuentas, incorporando la experiencia y el conocimiento de sus integrantes y, también, asumiendo el rol de generadores de información y redactores de capítulos del presente informe. Este grupo colegiado se verá fortalecido para el desarrollo de la nueva etapa de trabajo, que se atenderá a abordar las áreas de oportunidad planteadas en las conclusiones de los diversos capítulos, y que para responder a las propuestas de valoración económica es menester sumar a otros actores del mismo Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (como la SHCP, la Secretaría de Economía y el Banco de México) para complementar el equipo conformado por representantes del INECC, SEMARNAT, CONAFOR, CONANP, SADER, UNAM, UAM, COLMEX e INEGI, entre otros.

7 Conclusiones

El proyecto NCAVES México logró avances muy importantes con un primer ejercicio piloto a nivel nacional para la elaboración de las cuentas de extensión y condición de los ecosistemas terrestres y la valoración experimental de algunos servicios ecosistémicos, siguiendo los lineamientos propuestos por el marco del sistema de contabilidad de los ecosistemas, SEEA EA. Las cuentas se elaboraron a partir de varios conjuntos de datos nacionales, geoespaciales, económicos y ambientales, los cuales fueron integrados y compilados para tal efecto.

Los resultados obtenidos a nivel nacional permiten señalar que México cuenta con la información y las capacidades analíticas necesarias para poder implementar un sistema de contabilidad que cuantifique, valore y dé seguimiento a los ecosistemas y los servicios que estos proveen. Adicionalmente, se observa la necesidad de desarrollar datos y metodologías que estén armonizados con las definiciones y clasificaciones de conceptos del SEEA EA.

La colaboración inter e intrainstitucional y el intercambio de información han sido fundamentales para el desarrollo del proyecto. En este sentido, el INEGI ha tenido un papel esencial para asegurar la participación de los usuarios y los productores de información durante las etapas de compilación de las cuentas de ecosistemas. Estos esfuerzos de coordinación, para dar continuidad al proyecto, encuentran campo propicio en el marco de los órganos colegiados del SNIEG con el fin de aprovechar la infraestructura institucional existente y garantizar la transversalidad entre las unidades del Estado y diferentes disciplinas.

En este sentido, el piloto demostró también la importancia de tener un equipo multidisciplinario, ya que la compilación de cuentas requiere un alto grado de especialización en las áreas de contabilidad nacional, información geoespacial y observaciones de la Tierra, ecosistemas, biodiversidad, economía ambiental y ecológica, por lo que se necesitan de estas capacidades para poder interpretar los datos de manera correcta. La contribución de la Academia (científicos e investigadores) resultó de gran ayuda para la construcción de capacidades, así como en el trabajo técnico, como lo fue la creación de modelos biofísicos y de valoración económica, necesarios para la generación de datos insumo de las cuentas de ecosistemas.

Debe enfatizarse que para la elaboración de las cuentas piloto se utilizaron clasificaciones y datos abiertos a nivel nacional que pueden ser utilizados de manera inmediata. En México, existe información que tiene un uso potencial para las cuentas y que de alguna forma podría ser adaptada al marco de la contabilidad de los ecosistemas.

7.1 Principales resultados de las cuentas piloto de los ecosistemas

7.1.1 Cuentas de extensión

Las cuentas de extensión de los activos de los ecosistemas proveen información relevante al integrar varias capas de información geoespacial, que permiten visualizar la distribución de estos en el total del territorio y delimitarlos por regiones de interés, como: ANP, estados y ecorregiones. El análisis de su transformación a partir del uso de matrices de cambio permitió la identificación de procesos de transición y de indicadores de conversión y regeneración. Lo anterior es de suma utilidad, ya que permite priorizar las zonas donde están ocurriendo los principales procesos de cambio brindando información útil para la toma de decisiones y servir de referencia para la formulación de instrumentos de política pública en materia de restauración y conservación.

Como resultado de estas cuentas se observó que los ecosistemas que han tenido una mayor transformación son la selva perennifolia y la selva caducifolia, conservando alrededor de 50 % de su extensión original, lo que ocasiona modificaciones en la diversidad biológica y complejidad estructural. Por su parte, el pastizal ahora cubre casi el doble de su extensión original. El proceso de cambios que afecta la mayor extensión es la conversión de ecosistemas naturales a áreas antrópicas, que abarca un poco más de 3 % del territorio nacional. En el análisis temporal se observó un intercambio constante entre áreas deforestadas y regeneradas, por lo que la regeneración natural comprende la mitad de la extensión de conversión. Entre 2002 y 2014 se observa que los bosques de coníferas y mesófilo son los más convertidos en agricultura perenne y el matorral leñoso, en áreas urbanas, mientras que el no leñoso es el más convertido en agricultura anual.

7.1.2 Cuentas de condición

En nuestro país, derivado de la discusión y colaboración con diversas instituciones (INEGI, SEMARNAT, INECOL, CONABIO, CONAFOR, CONANP e IG de la UNAM), se decidió realizar la cuenta de condición incluida en el SEEA EA, utilizando como base el **Índice de Integridad Ecosistémica**, desarrollado de manera independiente y paralela por un grupo de investigadores en el Instituto de Ecología A. C, a partir de un planteamiento teóricamente coherente, integral y repetible, además de espacialmente explícito. Este índice tiene como propósito determinar la integridad (condición) de los ecosistemas mexicanos, aprovechando la gran cantidad de datos ambientales disponibles para el monitoreo ambiental del país (el Inventario Nacional Forestal y de Suelos —INFYS— y el Sistema Nacional de Monitoreo de la Biodiversidad —SNMB—, las cartas de uso del suelo y vegetación —CUSV— e imágenes satelitales). Además, como parte del proyecto, se contrastó la información obtenida por este índice con aquella obtenida al considerar el estado de conservación de la vegetación de las CUSV y el Índice de Huella Humana.

El Índice de Integridad Ecosistémica permite diferenciar entre variables **estructurales** (porcentaje de crecimiento arbóreo tropical y arbustivo), **funcionales** (fotosíntesis neta) y de **presión** (porcentaje cubierto por asentamientos humanos) y tiene el potencial de generar mayor robustez de análisis al integrar más variables a las redes bayesianas.

En general, entre 2004 y 2018, las **variables estructurales** sobre crecimiento arbóreo (estrato con altura mayor a 4 metros) mostraron incrementos en la mayoría de los ecosistemas forestales, mientras que el arbustivo (especies ramificadas desde la base con altura de 2 a 4 metros, y que forman principalmente bosques bajos y abiertos, y matorral subtropical) mostró tendencias negativas en casi todos los ecosistemas. Las **funcionales** presentaron, en general, una tendencia negativa en la mayoría de los ecosistemas, aunque con intensidades que fluctuaron entre moderadas a bajas. Por último, las de **presión** mostraron tendencias positivas, sobre todo la relacionada con asentamientos humanos y suelo desnudo. Al analizar los diferentes ecosistemas, se observa que los cambios más relevantes en la mayoría de las variables estructurales con tendencia negativa, varias de ellas, relativamente intensas, se presentaron en el matorral xerófilo no leñoso. En contraparte, los cambios negativos de mayor intensidad en las variables de funcionalidad se registraron en el matorral xerófilo leñoso. Por otra parte, los ecosistemas que presentaron los cambios más extremos son los antrópicos (acuícola, agricultura anual, agricultura permanente, asentamientos humanos y bosque cultivado).

7.1.3 Valoración económica de los servicios de los ecosistemas

En concordancia con el SEEA EA, en este piloto se utilizó un enfoque para aproximar a los valores de intercambio de los servicios ecosistémicos y, por lo tanto, excluye otros enfoques de valoración relacionados con otros servicios.

Para efectuar el análisis de la valoración monetaria de los servicios y activos de los ecosistemas, se requirió establecer una serie de supuestos (por ejemplo, el uso sustentable de los recursos naturales) y de inferencias con la finalidad de analizar detalladamente la forma en la que la provisión de dichos servicios impacta en la economía. Por ello, estos resultados deben considerarse como preliminares, pues la intención es generar un mayor conocimiento de la importancia que tienen los ecosistemas en la oferta total de bienes y servicios y, en particular, para el bienestar humano. En este sentido, se debe considerar que el estudio no abarca, en una primera etapa, toda la oferta de SE, sus potenciales valores futuros y sus valores intrínsecos.

De esta manera, los resultados obtenidos permiten identificar el valor monetario de algunos de los servicios de los ecosistemas en referencia con sus beneficios en las actividades económicas y humanas, por lo cual dejan espacio para que en etapas posteriores, de manera coordinada con las instituciones del sector ambiental, se trabaje en esquemas de valoración para el total de los ecosistemas o el valor de la naturaleza, con el fin de eliminar paulatinamente los supuestos iniciales y disminuir los factores de incertidumbre que se puedan haber presentado. No se omite señalar que el enfoque para la medición (cuantificación y valoración) se centra en los llamados servicios ecosistémicos finales, es decir, los flujos de servicios ecosistémicos entre los activos ecosistémicos y las unidades económicas.

En este análisis se incluyó exclusivamente la valoración monetaria de algunos de los servicios finales de los ecosistemas (por ejemplo, se excluyen los intercambios intermedios al interior de los ecosistemas) con valores de intercambio (*exchange values*) reales o imputados. En particular, se hace la propuesta piloto de valoración monetaria para los servicios que se mencionan en los siguientes apartados.

7.1.3.1 Servicio de provisión a la producción agrícola y cultivos seleccionados

El estudio de valoración para cultivos agrícolas seleccionados dejó ver que la contribución de estos servicios de provisión es relevante, aunque requiere de análisis posteriores para explicar la volatilidad y heterogeneidad de los valores obtenidos para los diferentes cultivos. Ello tiene una especial relevancia, atendiendo a que las actividades agrícolas contribuyen al PIB nacional, al empleo, a las exportaciones, al bienestar de la población rural, a la provisión de insumos y a la seguridad alimentaria del país. En principio, se determinó que el valor monetario estimado de la contribución de estos cultivos es consistente en el tiempo de manera agregada, pero que muestra una importante heterogeneidad por producto.

7.1.3.2 Servicio de regulación del almacenamiento y secuestro de carbono (en biomasa y suelo)

De acuerdo con el estudio de valoración económica de los SE, se determinó que la valoración monetaria del servicio de almacenamiento y captura (secuestro) de carbono puede realizarse en un marco contable consistente derivado del concepto de activos y flujos monetarios. Para ello, se consideró al secuestro de carbono como un servicio definido para un periodo determinado y al servicio anual del almacenamiento de carbono, como un *stock* que conforma un balance.

Cabe señalar que esta valoración es sensible a los valores seleccionados de precio del carbono y tasa de interés, con lo cual se muestra que las negociaciones en cambio climático pueden

incidir en el valor monetario del servicio y que puede, incluso, contribuir posteriormente a una mejora en la condición física de los ecosistemas.

Asimismo, se encontró que la descomposición de la evolución del secuestro de carbono en biomasa y suelos muestra comportamientos diferenciados. Al interior del estudio de carbono en biomasa, también se observan comportamientos disociados, como los de la vegetación primaria y secundaria. Por su parte, la georreferenciación del valor monetario del servicio de almacenamiento y secuestro de carbono muestra su importancia para las diferentes entidades del país. Por ejemplo, se aprecia un mayor flujo y concentración de carbono en el sur y occidente del país, lo que sugiere su importancia para la planeación del desarrollo regional. Además, la propuesta de valoración es consistente con el diseño de las políticas públicas en cambio climático, con la contabilidad de los activos y el nuevo marco contable de los ecosistemas.

7.1.3.3 Servicio de regulación por polinización en los cultivos agrícolas

La información revisada para la elaboración del presente piloto muestra que el servicio de polinización animal y, por lo tanto, su pérdida es relevante para la producción agrícola en México. En este sentido, el estudio muestra que el valor monetario de la demanda potencial del servicio de polinización total representó 12.09 % del valor de la producción agrícola nacional en 2013 y, en promedio, para el periodo 2003-2018 significó 12.73 % del total de la producción agrícola. En contrapartida, a nivel agregado, la oferta potencial promedio de la polinización animal para 2013 fue solo de 7.74 % para la producción agrícola y, en promedio, para el periodo 2003-2017 representó 8.15 % del valor bruto de la producción agrícola.

Estos resultados muestran que existe una diferencia entre la oferta y la demanda potenciales de polinización para la producción agrícola. Esto se explica, por un lado, por la expansión de la frontera agrícola que de 2002 a 2014 creció en 18.6 % (19 721 km²), que por lo general lo hace a expensas de hábitats para los polinizadores. Se han desarrollado formas de producción y capacidades diferenciadas por tipo de productores y/o producción para compensar el déficit de oferta de polinizadores.

7.1.3.4 Servicio de provisión y regulación del abastecimiento de agua

Los servicios de provisión, regulación y culturales de los recursos hídricos de los ecosistemas contribuyen, a través de diversos canales, a las actividades económicas y al bienestar de la población. Sin embargo, la diversidad de formas de servicio, los múltiples efectos y los procesos de retroalimentación de estos servicios dificultan su valoración monetaria. Así, estas estimaciones deben considerarse como preliminares y se requieren investigaciones adicionales para reducir los sesgos presentes con el fin de generar valores económicos que enriquezcan el análisis y la discusión.

El valor monetario del servicio hídrico de los ecosistemas, estimado por el método del precio unitario de la renta del recurso, resultó en 1.95 y 1.72 pesos por m³ a partir de datos derivados del Sistema de Cuentas Nacionales (SCN) y del Sistema Automatizado de Información Censal (SAIC), respectivamente. El valor monetario de la contribución los recursos hídricos para el consumo de los hogares corresponde a 0.052 y 0.039 % del PIB de 2013, considerando las dos fuentes de información mencionadas. Para 2018, se estimaron los valores de 0.044 y 0.033 % del PIB de 2018, respectivamente.

A nivel municipal, el valor monetario de la contribución de los recursos hídricos para el suministro se estimó en 0.011 y 0.014 % de 2013 y en 0.010 y 0.012 % del PIB de 2018 considerando las dos fuentes de información arriba mencionadas. Los costos anuales de reemplazo de aguas residuales municipales e industriales corresponden a 0.28 y 0.54 % del PIB de 2013 y a 0.25 y 0.49 % del PIB de 2017, respectivamente. Los costos de reemplazo por región hidrológica administrativa muestran que la mayor contribución monetaria de los servicios de los recursos hídricos de los ecosistemas a las actividades económicas y humanas se ubica en las zonas occidente y centro del país.

7.1.3.5 Servicios culturales en la economía del turismo de naturaleza

Analizando la información disponible sobre el turismo de naturaleza en las áreas naturales protegidas (ANP) es posible observar que se trata de una actividad de creciente importancia en la dinámica económica y social en México.

Las estimaciones del valor monetario permiten apreciar una contribución al producto de las 15 ANP consideradas como prioritarias por su interés turístico y biológico (definidas en el *Capítulo 7* de este documento) de 36 021 millones de pesos, que representan 0.22 % del PIB de 2013. Por otro lado, las estimaciones realizadas con un metaanálisis y una metarregresión (ver *Capítulo 7*) indican que el valor monetario se aproxima a 17 311 millones de dólares, lo que representa 1.36 % del PIB de 2013. Estos valores monetarios, derivados del metaanálisis, resultaron mayores a los valores monetarios contables, lo cual sugiere que existen aún oportunidades importantes para mejorar la medición de los valores del turismo de naturaleza y dejar ver la importancia que tienen otros servicios ecosistémicos en las ANP.

Se espera que las conclusiones y recomendaciones vertidas en este informe enriquezcan el proceso para lograr en el futuro un sistema integrado de contabilidad de ecosistemas nacional, con un enfoque geoespacial, alineado con el estándar internacional SEEA EA, y que sea relevante y de utilidad para las políticas y la toma de decisiones (ver la sección de discusión en los capítulos 4, 5 y 6 de este informe).

En este primer ejercicio de contabilidad hubo grandes avances que han marcado un camino a seguir para mejorar, consolidar y corroborar los resultados con grupos de expertos. Sin embargo, los resultados aún tienen carácter experimental, y se requiere de esfuerzos adicionales para mejorar paulatinamente las mediciones. En el caso de la valoración de servicios ecosistémicos, los resultados pueden señalar que el valor del beneficio de un servicio puede estar relacionado con factores ajenos al estado biofísico del activo ecosistémico, es decir, su explicación puede venir en buena medida por condiciones de mercado. Por tal razón, es importante profundizar en el análisis de la relación entre los flujos físicos y monetarios de los servicios y activos de los ecosistemas.

7.2 Próximas etapas: hacia la implementación de una contabilidad integrada

Además de las lecciones aprendidas particulares a cada una de las cuentas, se encontró que existen temáticas comunes que son fundamentales para la implementación de un sistema de contabilidad de ecosistemas que requieren acciones futuras para mejorar y consolidar los avances logrados. A continuación, se mencionan algunos de los tópicos que se estima deben considerarse en los próximos pasos para el desarrollo e implementación de las Cuentas de los Ecosistemas de México, en el marco del SEEA EA.

7.2.1 Disponibilidad e interoperabilidad de datos

La implementación del SEEA EA involucra la identificación, selección, integración y armonización de los datos disponibles y producidos en el país. Para la implementación de las cuentas, se identificaron series de datos ambientales generadas por distintas instituciones, entre ellas el INEGI, que permitieron lograr avances con el piloto en México.

Se concluyó la disposición de una infraestructura de información oficial a nivel nacional que hace posible tener los mejores datos disponibles. El sistema de información nacional cuenta con una arquitectura institucional que permite el trabajo específico y la identificación de información pertinente y de calidad para ser utilizada en la elaboración de las cuentas. El INEGI tiene un papel central tanto en la producción como en la coordinación del SNIEG, en conjunto con otras instituciones que desarrollan otros sistemas de información.

Cada uno de estos sistemas cuenta con la definición de un propósito, de métodos de administración e información que generan de manera periódica. Sin embargo, uno de los princi-

pales retos que se afrontaron durante este proyecto fue la compatibilidad entre la información disponible, pues esta se desarrolla conforme a las propias necesidades y, aunque comparten algunas características, no fue fácil integrarlos en el sistema de contabilidad del SEEA EA. Esta condición obligó a que en todos los casos la información fuera reorganizada o recalculada para homogenizar tanto su cobertura como su escala. Por ello, se concluyó que un esquema como el SEEA EA requiere una cuidadosa selección de la información para lograr su homogenización y así cumplir con los objetivos de la contabilidad nacional.

Asimismo, resulta importante tener equipos multidisciplinarios con las capacidades para distinguir e interpretar la información que se utiliza en la escala espacial y temporal en la que se está trabajando. Por ello, un enfoque de colaboración interinstitucional permite que las unidades productoras de datos, mediante acuerdos institucionales, puedan adecuar su propia información para ser utilizada en las cuentas de los ecosistemas. Esta colaboración asegura, por un lado, que la información de la institución mantenga su propósito y, por otro, que puede ser utilizada en la contabilidad. La principal ventaja de esta colaboración es tener su experiencia y conocimiento en la información institucional utilizada.

Dada la importancia de contar con un enfoque espacialmente explícito en la contabilidad de los ecosistemas, es necesario asegurar y mejorar la producción de los conjuntos de datos útiles que incluya aumentar su frecuencia a lo largo del tiempo. De la misma manera, se observó la utilidad de tener información oficial en formato de celdas (*raster*) que favorezca su organización y manejo, así como la vinculación con una configuración tabular que facilite el análisis y su posterior agregación en otras unidades de interés (municipio, estado, cuenca, región, etcétera).

El proyecto dejó claro que existe la necesidad de tener con datos a lo largo del tiempo que se desarrollen conforme a las definiciones y clasificaciones del SEEA EA o bien que puedan ser interoperables, de manera que exista una correspondencia directa con base en tablas de correspondencia para las distintas definiciones y clasificaciones. Por ejemplo, para calcular la cuenta de extensión del ecosistema, se utilizó la clasificación desarrollada por CONAFOR conforme a las directrices del IPCC. Un área de oportunidad identificada es trabajar con esta clasificación con el fin de alinearla con la del SEEA EA. Para ello, se debe trabajar en una clasificación nacional de ecosistemas de manera consensuada, mediante un proceso interinstitucional, que tenga correspondencia con las clasificaciones existentes. Adicionalmente, es importante explorar mecanismos para la interoperabilidad de los datos. En este sentido, se propone un mecanismo de interoperabilidad basado en técnicas de inteligencia artificial (*neural network*) y redes bayesianas (véase Anexo 9-2) con la finalidad de esclarecer vínculos y operar, a través de los múltiples conceptos, posibilidades de uso que quedan concentrados en las distintas formas de catalogar aspectos ecosistémicos de la geografía.

7.2.2 Consolidación e integración de las cuentas

Aunque se lograron avances muy significativos en la comprensión y determinación de la relación entre los análisis físicos y de valoración monetaria de los servicios ecosistémicos en una óptica integrada, por ejemplo, de canastas de servicios suministrados por tipo de ecosistema, es importante continuar trabajando con el fin de mejorar paulatinamente los enfoques empleados para comprender mejor las formas de cómo se vinculan los activos ecosistémicos con las actividades económicas.

Ahora que se ha completado una primera aproximación a las cuentas de extensión y de condición de los ecosistemas, habría que desarrollar una aproximación que vincule estas cuentas con la provisión de servicios ecosistémicos. Para profundizar el análisis de la relación entre la extensión y condición de los ecosistemas, es fundamental estimar los servicios ecosistémicos utilizando la misma estructura espacial. Es especialmente interesante, pues se aprecia que esta relación es no lineal con el desempeño económico. Esta no linealidad, que se expresa incluso como una asociación compleja con las decisiones y políticas que intervienen en torno al aprovechamiento de los recursos naturales, merece una revisión más profunda a la luz de los datos y enfoques disponibles. En el mismo sentido, es importante profundizar en los puntos de inflexión en los ecosistemas.

7.2.3 Canasta de servicios ecosistémicos y otras cuentas

Se considera importante incluir un conjunto más completo de servicios ecosistémicos que se puedan construir de manera gradual y con base en una evaluación previa para explorar las necesidades y la disponibilidad de datos. Se detectó la necesidad de profundizar no solo en servicios ecosistémicos individuales, sino también en un análisis integrado, considerando el resto de los servicios provistos por cada ecosistema (canastas de servicios ecosistémicos).

Durante el transcurso del proyecto NCAVES se hicieron esfuerzos para compilar la primera estimación de servicios de protección costera en términos físicos. Se considera de gran relevancia continuar con este trabajo por su importancia ecológica y económica. También, se re-

comienda explorar la elaboración de otras cuentas temáticas (suelos, bosques, biodiversidad, manglares, cuentas de océanos...), las cuales serían de gran utilidad en una estrategia para el despliegue de un sistema de contabilidad de ecosistemas, que considere tanto los terrestres como los acuáticos y marinos.

7.2.4 Expansión y fortalecimiento de los grupos de trabajo

El SEEA EA tiene la ventaja de promover la producción de nuevos flujos de información y de procesos de integración de datos que permiten una interacción entre sistemas que se encuentran en silos o sectorizados. Aunque las cuentas se pueden elaborar de manera individual, quedó demostrado que analizar cada una de ellas por separado es insuficiente y de ahí surge el interés en desarrollar una aproximación sistémica amplia, como la del SEEA EA. La interacción transdisciplinaria basada en recursos de información integrados sobre subsistemas involucrados es altamente recomendable. El desarrollo de este enfoque requiere, además, crear nuevos espacios de discusión multidisciplinarios y multisectoriales donde la dimensión socioambiental sea integrada con una perspectiva transversal. El INEGI, junto con la SEMARNAT, tiene aquí un papel muy importante para promover la discusión y el debate para continuar impulsando la formación y el fortalecimiento de grupos de trabajo de acuerdo con una agenda de investigación que permita lograr una contabilidad integrada y coherente.

7.2.5 Fortalecimiento de capacidades, coordinación y colaboración institucional

Como se ha mencionado a lo largo de este informe, el desarrollo de este primer piloto no hubiera sido posible sin la colaboración intra e interinstitucional y el papel central del INEGI como coordinador de la información. El desarrollo constante de capacidades tanto de productores como usuarios de la información es primordial para poder lograr la operacionalización

de las cuentas. Dado que este proceso tiene una curva de aprendizaje, es recomendable la colaboración entre expertos provenientes de las instituciones, de universidades y centros de investigación que puedan desarrollar soluciones innovadoras al mismo tiempo que apoyen en la transmisión de conocimiento y desarrollo de capacidades.

Es necesario continuar promoviendo el fortalecimiento de esta cooperación interinstitucional y el involucramiento de las instituciones académicas que pueden contribuir a la innovación y a la implementación de modelos y datos que agilicen la preparación de la información y la integración de las cuentas. A raíz de este piloto, se han identificado hallazgos y áreas de oportunidad para mejorar la compilación de las cuentas, entre ellos, se incluyen la incorporación de nuevas variables o indicadores al Índice de Integridad Ecosistémica, la revisión de la clasificación de ecosistemas utilizada para la contabilidad, la alineación temporal y espacial de las cuentas, así como la mejora de las estimaciones de servicios de los ecosistemas y la vinculación entre condición y la provisión de servicios ecosistémicos. Finalmente, se propone hacer una evaluación crítica sobre la viabilidad de las definiciones, clasificaciones y variables e indicadores para que cumplan con los criterios establecidos por el SEEA EA.

Más allá, de la parte estadística y de la mejora de modelos biofísicos y del fortalecimiento de grupos técnicos de trabajo, es muy importante escalar el mecanismo de coordinación existente, donde continúen participando representantes del INEGI, del sector ambiental y, además, otros sectores identificados en este proyecto, como el agropecuario, el económico y otros expertos en las áreas de conocimiento que se requieren para tener una contabilidad de ecosistemas. Poder contar con una estrategia inclusiva y con un enfoque holístico permite aprovechar todo el potencial del sistema de cuentas de ecosistemas para evaluar las dimensiones del paradigma de sostenibilidad y propiciar el bienestar al que se aspira en el país.

7.2.6 Integración institucional

Un sistema como la nueva contabilidad de ecosistemas deberá encontrar formas de articulación con los instrumentos de política que operan en el país. Es el caso de instrumentos como los planes de ordenamiento territorial y los de evaluación ambiental, así como otros que se resumen a continuación.

El análisis del marco legal y los instrumentos de política demuestran que hay suficientes elementos por los cuales la generación, la actualización y el uso de la información sobre extensión, condición y valoración de servicios ecosistémicos son un aporte fundamental para el cumplimiento de las disposiciones contenidas en al menos ocho leyes federales en materia de medio ambiente y recursos naturales, agua, desarrollo forestal, desarrollo rural sustentable, cambio climático y vida silvestre. Estos fundamentos tienen que ver tanto con la definición ex-

pública de servicios ambientales como con el aporte que la información de este proyecto da a la aplicación y evaluación de los instrumentos de política derivados de estas leyes. La utilidad de la información de las cuentas para el sector ambiental destaca como insumo para instrumentos como el ordenamiento ecológico del territorio (OET), las áreas naturales protegidas y la evaluación del impacto ambiental, el pago por servicios ambientales, así como los instrumentos para la restauración de ecosistemas y para la compensación ambiental por cambio de uso de suelo. En otros sectores, esta información puede mejorar la toma de decisiones en las políticas del sector agropecuario, así como en las de desarrollo urbano, territorial y agrario, y en todas aquellas que inciden de manera directa en el uso de territorio. Estos sectores han sido los impulsores principales de los factores de presión que impactan tanto en la extensión como en la condición de los ecosistemas, por lo tanto, el conocimiento y uso de este tipo de información tiene el potencial para que, en el diseño de estas políticas, se logre visibilizar su impacto en el territorio y promover su disminución. Finalmente, los resultados de este proyecto contribuyen a la construcción de indicadores que permitan el monitoreo sistemático y la evaluación de las políticas públicas.

La generación de la información en el marco del proyecto NCAVES para México apoya, además, el cumplimiento de los compromisos internacionales en materia de biodiversidad, cambio climático, lucha contra la desertificación y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Destaca también el apoyo que el SEEA EA brinda para la derivación de indicadores para el Marco de Monitoreo del Marco Global de Biodiversidad Post-2020. A nivel nacional, destaca el *Diálogo intergubernamental sobre la actualización de las Contribuciones Determinadas a nivel nacional* promovido por la SEMARNAT y el INECC. Es importante poder incorporar el concepto y los usos de la contabilidad de ecosistemas para apoyar estas iniciativas a nivel nacional.

Con respecto al papel que juegan distintos actores en el marco del proyecto, se debe destacar que los usuarios y proveedores de la información forman un espectro amplio y diverso que incluye: a) actores de gobierno: secretarías y dependencias de la Administración Pública Federal, organismos autónomos, comisiones intersecretariales, gobiernos estatales y gobiernos municipales y b) otros actores, como el H. Congreso de la Unión, universidades y centros de comunidades y sociedad en general, entre otros. En este sentido, es necesario destacar que la información que se genera a través de los sistemas de información y de los inventarios provee elementos para un mejor uso del territorio.

Si bien el territorio nacional es heterogéneo, tanto ambiental como económica y socialmente, los resultados de este proyecto aportan al entendimiento de cuáles son y dónde están las principales dinámicas de cambio de los ecosistemas y de los servicios que proveen. Esta información tiene un alto potencial de apoyar a una mejor toma de decisiones no solo en el contexto federal, sino a nivel subnacional, en estados, regiones y municipios.

Se debe destacar que contabilizar la extensión y condición de los ecosistemas, así como la cuantificación y valoración de los servicios que proveen ofrece un nuevo marco de referencia para el diseño de políticas con implicaciones territoriales. A través de esta contabilidad, la toma de decisiones podrá considerar no solo los beneficios económicos y sociales

y la provisión de servicios ecosistémicos que proporcionan los ecosistemas, sino también la capacidad que tienen para mantenerse en funcionamiento. Finalmente, la vinculación entre las necesidades de los usuarios con la información que resulta de la contabilidad de ecosistemas hace que este marco pueda ser útil para la toma de decisiones en el diseño de políticas, planes y programas.

En resumen, a nivel conceptual y metodológico, los siguientes pasos deberán incluir:

- Ampliar la oferta de datos sobre flujos físicos de los servicios ecosistémicos que permitan fortalecer las posibilidades de valoración económica en el esquema integrado de las cuentas.
- Vincular los datos físicos de las cuentas de ecosistemas (extensión y condición) con los flujos de servicios y las cuentas de *stock*.
- Fortalecer los vínculos entre las cuentas biofísicas y monetarias para que la valoración de los servicios ecosistémicos sea un reflejo fiel del estado, la extensión y la condición de los ecosistemas.
- Utilizar datos geoespaciales y de observaciones de la Tierra, incluyendo el uso del *Cubo de Datos Geoespacial*, para integrar la dimensión espacial en los análisis a nivel nacional y subnacional (por ejemplo, áreas naturales protegidas, cuencas hidrográficas, municipios). Esta es una de las principales aportaciones que México puede hacer al marco SEEA EA, considerando que tiene una base espacial desde su origen.
- Explorar la compilación de las cuentas de biodiversidad, cambio climático y cuentas oceánicas e incluir la protección costera y la reducción del riesgo de desastres como servicios ecosistémicos clave. Con ello se tenderían puentes para alinearse con las discusiones a nivel internacional, donde temáticas como la valoración económica y la medición adecuada de la biodiversidad están aún en proceso.

Por su parte, para un seguimiento integral de la contabilidad de los ecosistemas, particularmente en lo que toca a su organización y gobernanza, se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

- La necesidad de una institucionalización incluyente, dentro de la infraestructura del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica como un órgano colegiado transversal.
- Consolidar la participación interinstitucional que, además de incluir al sector ambiental en su sentido más amplio, involucre a sectores políticos clave, como agricultura, finanzas, economía, turismo y desarrollo territorial, así como a la Academia y el sector privado (cuentas de empresas).
- En ese sentido, es importante integrar a las instituciones relevantes como socios estratégicos en el desarrollo futuro de los temas, tanto como fuentes importantes de datos y usuarios de la información como actores clave en las discusiones conceptuales, metodológicas y en la identificación de necesidades de información para el diseño y monitoreo de políticas públicas.

8 Referencias

- Acevedo Gasman, F. *et al.* (2009). “La bioseguridad en México y los organismos genéticamente modificados: cómo enfrentar un nuevo desafío”, en: *Capital natural de México*. Vol. II: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México, CONABIO, pp. 319-353.
- Alatorre, J. E., K. Caballero, J. Ferrer y L. M. Galindo (2019). *EL costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina. Estudios de cambio climático en América Latina*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Anta, S. *et al.* (2008). “Consecuencias de las políticas públicas en el uso de los ecosistemas y la biodiversidad”, en: *Capital natural de México*. Vol. III: *Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad*. México, CONABIO, pp. 87-153.
- Barbier, E. (2013). “Valuing ecosystem services for coastal wetland protection and restoration: progress and challenges”, en: *Resources*. 2(3), pp. 213-230.
- Bateman, I., S. Ferrini, R. Brouwer y M. Schaafsma (2011). “Making benefit transfers work: deriving and testing principles for value transfers for similar and dissimilar sites using a case study of the non-market benefits of water quality improvements across Europe”, en: *Environmental and Resource Economics*. 50(3), pp. 365-387.
- Bland, L. M., K. E. Watermeyer, D. A. Keith, E. Nicholson, T. J. Regan y L. J. Shannon (2018). “Assessing risks to marine ecosystems with indicators. ecosystem models and experts”, en: *Biol. Conserv.* 227, pp. 8-19. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.08.019>
- Boege, E. (2008). *El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México: hacia la conservación in situ de la biodiversidad y agrobiodiversidad en los territorios indígenas*. Instituto Nacional de Antropología e Historia y Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas.
- Challenger, A. *et al.* (2009). “Factores de cambio y estado de la biodiversidad”, en: *Capital natural de México*. Vol. II: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México, CONABIO.
- Champ, P., K. Bolye y T. Brown (2017). *A Primer on Nonmarket Valuation*. Springer.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2017). *Áreas naturales protegidas federales*. CDMX, México, CONANP, Dirección de Evaluación y Seguimiento, Subdirección Encargada de la Coordinación de Geomática.
- _____. (2019). *Marco Estratégico de Turismo Sustentable en Áreas Naturales Protegidas de México*.
- Comisión Nacional del Agua (2012). *Programa Hídrico Regional. Visión 2030 por Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA)*. México, CONAGUA.
- _____. (2018). *Estadísticas del agua en México*. México, CONAGUA.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2018). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe de resultados 2009-2014*.

- _____ (2018). *Programa Nacional Forestal (PRONAFOR)*. Libro blanco. Consultado en abril de 2021. Disponible en: [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7625Programa%20Nacional%20Forestal%202014-2018\(PRONAFOR\).pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7625Programa%20Nacional%20Forestal%202014-2018(PRONAFOR).pdf)
- Comisión Nacional para Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2008a). *Capital natural de México*. Vol. I: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. México, CONABIO.
- _____ (2009). *Capital natural de México*. Vol. II: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México, CONABIO.
- _____ (2014). *Quinto Informe Nacional de México ante el CDB*. México, CONABIO. Disponible en <https://www.cbd.int/doc/world/mx/mx-nr-05-es.pdf>
- _____ (2016). *Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México y Plan de Acción 2016-2030*. México, CONABIO. Disponible en <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/12890.pdf>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) (2018). *Resultados de pobreza en México 2018 a nivel nacional y por entidades federativas*. México, CONEVAL. Disponible en <https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza-2018.aspx>
- Costanza, R., R. d'Arge y R. Groot (1997). "The value of the world's ecosystem services and natural capital", en: *Nature*. 387, pp. 253-260.
- Czúcz, B., Z. Molnár, F. Horváth, G. G. Nagy, Z. Botta-Dukát y K. Török (2012). "Using the natural capital index framework as a scalable aggregation methodology for regional biodiversity indicators", en: *J. Nat. Conserv.* 20, pp. 144-152. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2011.11.002>
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (1980). *Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios*. Publicada en el DOF el 30 de diciembre de 1980. Última reforma publicada DOF 09-12-2019. Cuotas actualizadas por Acuerdo DOF 24-12-2020 (el impuesto al carbono se incluyó en 2013).
- _____ (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Publicada en el DOF el 28 de enero de 1988. Última reforma, 5 de junio de 2018.
- _____ (1992). *Ley de Aguas Nacionales*. Publicada en el DOF el 1 de diciembre de 1992. Última reforma, 6 de enero del 2020.
- _____ (2000). *Ley General de Vida Silvestre*. Publicada en el DOF el 3 de julio de 2000. Última reforma, 19 de enero de 2018.
- _____ (2001). *Ley de Desarrollo Rural Sustentable*. Publicada en el DOF el 7 de diciembre de 2001. Última reforma, 12 de abril de 2019.
- _____ (2012). *Ley General de Cambio Climático*. Publicada en el DOF el 6 de junio de 2012. Última reforma, 13 de julio de 2018.
- _____ (2013). *Ley Federal de Responsabilidad Ambiental*. Publicada en el en el DOF el 7 de junio de 2013.
- _____ (2017). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Publicada en el DOF el 5 de febrero de 2017. Última reforma, 28 de mayo de 2021.
- _____ (2018). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. Publicada en el DOF el 5 de junio de 2018.
- _____ (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. Publicado en el DOF el 12 de julio de 2019.

- _____. (2020a). *Acuerdo por el que se dan a conocer las Disposiciones Generales aplicables a las Reglas y Lineamientos de Operación de los Programas de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*. Publicado en el DOF el 14 de febrero del 2020.
- _____. (2020b). *Reglas de Operación del Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2020*. Publicadas en el DOF el 16 de enero del 2020.
- _____. (2020c). *Acuerdo por el que se emiten las Reglas de Operación del Programa Sembrando Vida, para el ejercicio fiscal 2020*. Publicado en el DOF el 30 de marzo del 2020.
- _____. (2020d). *Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024*. Publicado DOF el 7 de julio de 2020.
- _____. (2020e). *Programa Nacional Forestal 2020-2024*. Publicado en el DOF el 25 de noviembre del 2020.
- _____. (2020f). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. Publicado en el DOF el 30 de diciembre del 2020.
- _____. (2020g). *Programa Sectorial de Agricultura y Desarrollo Rural 2020-2024*. Publicado en el DOF el 25 de junio de 2020.
- _____. (2020h.) *Lineamientos de Operación del Programa de Compensación Ambiental por Cambio de Uso del Suelo en Terrenos Forestales*. Publicado en el DOF el 9 de junio de 2020.
- EcoValor (2017). *EcoValor Mx: ¿qué queremos?* CONANP-GIZ. Página informativa disponible en http://www.ecovalor.mx/que_queremos.html
- _____. (2021). GIZ. CONANP. SEMARNAT. México, Gobierno de la República.
- Edens, B., P. Elsasser y E. Ivanov (2019). *Discussion paper 6: Defining and valuing carbon related services in the SEEA EEA. Paper submitted to the Expert Meeting on Advancing the Measurement of Ecosystem Services for Ecosystem Accounting*. New York, 22-24 January 2019 and subsequently revised. Version of 15 March 2019.
- Edens, B. y C. Graveland (2014). "Experimental valuation of Dutch water resources according to SNA and SEEA", en: *Water Resources and Economics*. 7, pp. 66-81.
- Equihua, M., O. Pérez-Maqueo, P. Maeda, J. Equihua, M. Schmidt, M. Munguia, N. Garcia-Alaniz, M. Kolb, S. Villela, E. Robredo, S. Martínez y O. López (2020). *A big data and machine learning approach for monitoring the condition of ecosystems*.
- Espinosa, D. et al. (2008). "El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural", en: *Capital natural de México*. Vol. I: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. México, CONABIO, pp. 33-65.
- Food and Agricultural Organization (FAO) (1996). *Forest resources assessment 1990 Survey of tropical forest cover and study of change processes*. Rome, Italy, FAO.
- Farber, S., R. Costanza y M. Wilson (2002). "Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services", en: *Ecological Economics*. 43(1), pp. 375-392.
- Fick, S. E. y R. J. Hijmans (2017). "World Clim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas", en: *International Journal of Climatology*. Issues 2. Octubre, pp. 4302-4315.
- Global Forest Resources Assessment (2016). *La evaluación de los recursos forestales mundiales*. Rome, Italy, FAO, United Nations.
- Galindo, L. M. y S. Basurto (2021). *Valoración monetaria de los servicios de los ecosistemas en México*. Documento de trabajo. México, INEGI.

- Gallai, N. y B. Vaissière (2009a). *Guidelines for the economic valuation of pollination services at a national scale*. Rome, FAO.
- Gallai, N., J. M. Salles, J. Setteley y V. E. Vaissière (2009b). "Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline", en: *Ecological Economics*. 68, pp. 810-821.
- García Alaniz, N., M. Schmid, M. Equihua, P. Maeda, J. Equihua, O. Pérez-Maqueo, J.J. Flores Martínez, S. A. Villela Gaytán, E. Serrano Gálvez, R. Rodríguez Franco y J. C. Leyva Reyes (2015). "Mexican National Biodiversity and Degradation Monitoring System", en: *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 26-27 y 7-11. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.01.001>
- Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Contribución Determinada a nivel nacional: México. Versión actualizada 2020*.
- Guimaraes, R., R. Fernández de Almeida, O. Cruz-Neto, M. Tabarelli, B. F. Viang, C. A. Pérez y A. Valentina (2020). "Pollination ecosystem services: A comprehensive review of economic values", en: *Research. Funding and policy actions Food Security*. Mayo, pp. 1-19.
- Hanley, N. T., D. Breeze, C. Ellis, D. Goulson (2015). "Measuring the economic value of pollination service: principles", en: *Evidence and knowledge gaps Ecosystem Services*. Vol. 14, pp. 124-132.
- Holdridge, L. R. (1967). *Life zone ecology*. Rev. ed. San José, Costa Rica, Tropical Science Center.
- Horlings, E., S. Schenau, L. Hein, M. Lof, L. de Jong y M. Polder (2019b). *Experimental monetary valuation of ecosystem services and assets in the Netherlands*. Technical Background report. University of Wageningen.
- Howard, P. y T. Sterner (2017). "Few and not so far between: A metaanalysis of climate damage estimates", en: *Environmental Resource Economics*. 68, junio, pp. 197-225.
- Instituto Nacional de Estadística. Geografía e Informática (INEGI), CONABIO e Instituto Nacional de Ecología (INE) (2008). *Ecorregiones terrestres de México. Escala 1:1 000 000*. México, INEGI-CONABIO-INE.
- _____. (2003). *Vegetación primaria. Escala 1:1 000 000*. México, INEGI.
- _____. (2005). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie III continuo nacional*. Aguascalientes, México, Dirección General de Geografía INEGI.
- _____. (2007). *Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000 (vectorial)*. Aguascalientes, México, INEGI.
- _____. (2008). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie IV continuo nacional*. Aguascalientes, México, Dirección General de Geografía, INEGI.
- _____. (2011). *Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010*. Aguascalientes, México, INEGI.
- _____. (2014). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250.000. Serie V continuo nacional*. Aguascalientes, México, Dirección General de Geografía, INEGI.
- _____. (2014c). *Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie V*. Aguascalientes, México, INEGI, 195 pp.

- _____. (2016). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI continuo nacional*. Aguascalientes, México, Dirección General de Geografía, INEGI.
- _____. (2016). *División política estatal 1:250 000. 2015*. Aguascalientes, México, Dirección General de Geografía, INEGI.
- _____. (2017c). *Guía para la interpretación de cartografía. Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI*. Aguascalientes, México, Dirección General de Geografía, INEGI.
- _____. (2013). *Fuentes y metodologías año base 2013. Sistema de Cuentas Nacionales de México*. Aguascalientes, México, INEGI.
- _____. (2014). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)*. Aguascalientes, México, INEGI.
- _____. (2019). *Censos Económicos. Varios años*. Aguascalientes, México, INEGI.
- _____. (2021). *Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2020*. Aguascalientes, México, INEGI.
- _____. *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Varios años*. Aguascalientes, México, INEGI.
- InVEST. Disponible en: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/reservoirhydropowerproduction.html>
- IPBES (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Brondizio, E. S., J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (eds.). Bonn, Germany, IPBES secretariat.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *Cambio climático 2014: impactos. adaptación y vulnerabilidad*. Naciones Unidas.
- _____. (2006). *Guidelines for National Green house Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Eggelston, H.S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe (eds.). Japan, IGES.
- IUCN (2020). *IUCN Global Ecosystem Typology*. Consultado el 7 de diciembre de 2020 en: <https://iucnrl.org/about-rle/ongoing-initiatives/global-ecosystem-typology/>
- Keith *et al.* (2020). *The IUCN ecosystem typology. International Union for Nature Conservation*.
- Kennedy, C. M., E. Lonsdorf, M. C. Neel, N. M. Williams, T. H. Ricketts, R. Winfree, R. Bommarco, C. Brittain, A. L. Burley, L. G. Carneiro, N. P. Chacoff, S. A. Cunningham, B. N. Danforth, J-H. Dudenhofer, E. Elle, H. R. Gaines, L. A. Garibaldi, C. Gratton, A. Holzschuh, R. Isaacs, S. K. Javorek, S. Jha, A. M. Klein, K. Krewenka, Y. Mandelik, M. M. Mayfield, L. Morandin, L. A. Neame, M. Otieno, M. Park, S. G. Potts, M. Rundlof, A. Saez, I. Steffan-Dewenter, H. Taki, B. F. Viana, C. Westphal, J. K. Wilson, S. S. Greenleaf y C. Kremen (2013). "A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems", en: *Ecology Letters*. 1685, marzo, pp. 584-599.
- Klein, A. M., B. E. Vaissière, J. H. Cane, Steffan-Dewenter, I. Cunningham, S. A. Kremen y T. Tscharntke (2007). "Importance of pollinators in changing landscapes for world crops", en: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 274, pp. 303-313.
- Kolb, M. y L. Galicia (2012). "Challenging the linear forestation narrative in the Neo-tropic: regional patterns and processes of deforestation and regeneration in southern Mexico", en: *The Geographical Journal*. 178 (2), pp. 147-161.
- Lipsey, M. W. y D. B. Wilson (2001). *Practical Meta-Analysis*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.

- Lonsdorf, E., C. Kremen, T. Ricketts, R. Winfree, N. Williams y S. Greenleaf (2009). "Modelling pollination services across agricultural landscapes", en: *Ann. Bot.* 103, pp- 1589-1600.
- Maeda, P. (2013). *Delta V.P. escala 1:1.000.000*.
- Maes, J., A. Teller, M. Erhard, B. Grizzetti, J. I. Barredo, M. L. Paracchini, S. Condé, F. Somma, A. Orgiazzi, A. Jones, A. Zulian, S. Vallecillo, J. E. Petersen, D. Marquardt, V. Kovacevic, D. Abdul Malak, A. I. Marin, B. Czúcz, A. Mauri, P. Löffler, A. Bastrup-Birk, K. Biala, T. Christiansen y B. Werner (2018). *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services: An analytical framework for ecosystem condition*. Publications office of the European Union, Luxembourg.
- Markandya, A. (2019). *Ecosystem disservices and externalities*. Paper drafted as input into the revision of the system on environmental-Economic Accounting 2012-Experimental Ecosystem Accounting.
- _____. (2020). *Guideline on valuation of ecosystem services in the context of the SEEA-EEA*. Drafted version.
- Mas, J. F., A. Velázquez, J. Reyes Díaz-Gallegos R. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, G. Bocco, R. Castro, T. Fernández, and A. Pérez-Vega (2004). "Assessing land use/cover changes: a nationwide multidecadate spatial database for Mexico", en: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 5, pp. 249-261.
- Mendelshon, R., W. D. Nordhaus y D. Shaw (1994). "The impact of global warming agriculture: A Ricardian Analysis", en: *The American Economic Review*. Vol. 84, No. 4, septiembre, pp. 753-771.
- Mora, F. (2017). "A structural equation modeling approach for formalizing and evaluating ecological integrity in terrestrial ecosystems", en: *Ecol. Inform.* 41, pp. 74-90. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.05.002>
- Newbold, T., L. N. Hudson, A. P. Arnell, S. Contu, A. de Palma, S. Ferrier, S. L. L. Hill, A. J. Hoskins, I. Lysenko, H. R. P. Phillips, V. J. Burton, C. W. T. Chng, S. Emerson, D. Gao, G. Pask-Hale, J. Hutton, M. Jung, K. Sanchez-Ortiz, B. I. Simmons y A. Purvis (2016). "Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment", en: *Science*. 353(6296), pp. 288-291.
- Obst, C., L. Hein & B. Edens (2016). "National Accounting and the Valuation of Ecosystem Assets and Their Services", en: *Environmental and Resource Economics*. 64(1), pp. 1-23.
- OCDE (Atkinson, G., N. A. Braathen, B. Groom y S. Mourato eds.) (2018). *Cost benefit analysis and the environment: Further Development and Policy Use*. OCDE.
- Paz Pellat, F., C. Cruz, J. Argumedo y J. Etchevers (2012). "Mapas nacionales del carbono orgánico en los suelos a escala nacional para las series II, III y IV de uso del suelo de INEGI", en: Paz, F. y R. Cuevas (eds.). *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2011*. Serie Síntesis nacionales. Estado de México, México, Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología, pp. 296-306. ISBN 978-607-715-085-5.
- _____. (2010). *Cálculo de COS para las diferentes clases de vegetación consideradas en el informe nacional sobre evaluación de recursos forestales mundiales. México 2010*. Informe preparado para CONAFOR, Texcoco, estado de México. Disponible en: http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php

- Paz Pellat, F., J. Argumedo Espinoza, C. O. Cruz Gaistardo, J. D. Etchevers y B. de Jong (2016a). "Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México", en: *Terra Latinoamericana*. 34, pp. 289-310.
- PNUD (2017). *Análisis de las políticas públicas e institucional en materia de biodiversidad en México*. Elaborado en el marco de la Iniciativa Finanzas de la Biodiversidad (BIOFIN-México).
- Pourret, O. (2008). *Bayesian Networks: A practical guide to applications*. West Sussex, England, John Wiley & Sons, Ltd. Chichester.
- Remme, R. P., B. Edens, M. Schroter y L. Hein (2015). "Monetary Accounting of Ecosystem services: a test for Limburg province", en: *The Netherlands. Ecological Economics*. Vol. 112, abril, pp. 116-128.
- Reynaud, A. and D. Lanza (2015). *A global meta-Analysis of ecosystem services values provided by lakes*. Presented at the 2nd Annual Conference of the French Association of Environmental and Resource Economists, 10-11 September in Toulouse.
- Ricketts, T. H., J. Regetz, I. Steffan-Dewenter, S. A. Cunningham, C. Kremen, A. Bogdanski, B. Gemmill-Herren, S.S. Greenleaf, A. M. Klein, M. M. Mayfield, L. A. Morandin, A. Ochieng & B. F. Viana (2008) "Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns?", en: *Ecology Letters*. 11, pp. 499-515.
- Roche, P. K. y C. S. Campagne (2017). "From ecosystem integrity to ecosystem condition: a continuity of concepts supporting different aspects of ecosystem sustainability", en: *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 29, pp. 63-68. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.12.009>
- Rodríguez, Ivette Renée (2002). *Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México*. Documento de trabajo. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rzedowski, J. (1990). *Vegetación potencial. IV.8.2. Atlas Nacional de México*. Volumen II. Escala 1:4 000 000. México, Instituto de Geografía, UNAM. Disponible en https://geodigital.igg.unam.mx/atlas_nacional/index.html/grals/Tomo_II/IV.Naturaleza/IV.8.Biogeografia/IV.8.2.jpg
- Sarukhán et al. (2009). *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. México, CONABIO.
- Sarukhán, J., J. Carabias, P. Koleff y T. Urquiza-Haas (2012). *Capital natural de México: acciones estratégicas para su valoración, preservación y recuperación*. México, CONABIO.
- Sarukhán et al. (2017). *Capital natural de México. Síntesis: evaluación del conocimiento y tendencias de cambio, perspectivas de sustentabilidad, capacidades humanas e institucionales*. México, CONABIO.
- Sánchez-Colón, S. (2019). *Natural Capital Accounting and Valuation of Ecosystem Services Project*. Pilot testing the SEE-EEA Framework in Mexico. System of Environmental Economic Accounting Extension.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) (2019). *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2019). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Edición 2018*. México, SEMARNAT.
- SEMARNAT e Instituto Nacional de Ecología (INEC) (2009). *México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
- _____. (2006). *México Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (2018). *Sistema Urbano Nacional 2018*.

- Secretaría de Turismo (SECTUR) (2018). *Encuesta Nacional de Gasto Turístico en los Hogares (ENGATURH)*. México, SECTUR.
- SEEA (2020a). “Draft glossary of terms”, en: *System of Environmental-Economic Accounting 2012-Experimental Ecosystem Accounting Revision*.
- _____ (2020b). “Chapter 5: Accounting for Ecosystem Condition: Chapter Draft prepared for Global Consultation”, en: *System of Environmental-Economic Accounting 2012-Experimental Ecosystem Accounting Revision*, pp. 1-4.
- SEEA EA (2020). *Draft for the Global Consultation on the complete document*. October 2020. System of Environmental-Economic Accounting-Ecosystem Accounting. Disponible en https://seea.un.org/sites/seea.un.org/files/documents/EEA/Revision/1._seea_ea_complete_draft_for_global_consultation_oct_2020.pdf (revised version will be forthcoming Jan, 2021 as background document to the UN Statistical Commission).
- Stern, N. (2006). *Stern review on the Economics of Climate Change*. Disponible en www.sternreview.org.uk.
- United Nations (2020). *System of Environmental-Economic Accounting-Ecosystem Accounting Draft for the Global Consultation on the complete document*. United Nations.
- _____ (2021). *System of Environmental Economic Accounting-Ecosystem Accounting. Final Draft*. Background document for the UN Statistical Commission. Feb. 2021. Disponible en http://unstats.un.org/unsd/statcom/52nd-session/documents/BG-3f-SEEA-EA_Final_draft-E.pdf
- _____ (2014). *System of Environmental-Economic Accounting. 2012-Experimental Ecosystem Accounting-SEEA EEA*. New York, United Nations.
- _____ (2019). *Technical Recommendations in support of the System of Environmental-Economic Accounting 2012-Experimental Ecosystem Accounting*. New York, United Nations.
- _____ (2021). *System of Environmental Economic Accounting-Ecosystem*. Department of Economic and Social Affairs, Statistical Division, United Nations, version 2021. Febrero.
- United Nations, European Commission, Food and Agricultural Organization of the United Nations, International Monetary Fund, Organisation for Economic Co-operation and Development, The World Bank (2014a). *System of Environmental-Economic Accounting 2012-Central Framework*. New York, United Nations.
- _____ (2014b). *System of Environmental-Economic Accounting 2012-Experimental Ecosystem Accounting*. New York, United Nations.
- UN-SEEA-WATER (2012). *System of Environmental Economic Accounting for Water*. New York, United Nations.
- Villers, L. e I. Trejo (1998). “Impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México”, en: *Interciencia*. 23, pp.10-19.
- Villers, L., N. Arizpe, R. Orellana y J. Lozano (2009). “Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México”, en: *Interciencia: Revista de Ciencia y Tecnología de América*. Vol. 34, Núm. 5, pp. 322-329.
- Vaissiere, B., B. M. Freitas y B. Gemill-Heren (2011). *Protocol to detect and assess pollination deficits in crops: a handbook for its use. Pollination services for Sustainable agriculture. Field manuals*. Rome, FAO.

- Walz, U. y C. Stein (2014). "Indicators of hemeroby for the monitoring of landscapes in Germany", en: *J. Nat. Conserv.* 22, pp. 279-289. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.01.007>
- Winfrey, R., B. J. Gross y C. Kremen (2011). "Valuing pollination services to agriculture", en: *Ecological Economics*. Vol. 71, pp. 80-88.

9 Anexos

9.1 Clasificación de los ecosistemas terrestres en México y su correspondencia con otras clasificaciones

Cuadro 9-1. Clasificación completa del INEGI y correspondencia con las clases agregadas que ha preparado CONAFOR para reportar ante el IPCC. También se muestra la correspondencia, aproximada, con la tipología de la IUCN

Continúa

INEGI	CONAFOR-IPCC-N3	IUCN Global Ecosystem Typology
Acuacultura	Acuacultura	F3 Artificial wetlands
Cuerpos de agua	Cuerpos de agua	F1 Rivers and streams/F2 Lakes/F3 Artificial wetlands
Agricultura de humedad anual	Cultivos anuales	T7.1 Croplands
Agricultura de humedad anual y permanente		
Agricultura de humedad anual y semipermanente		
Agricultura de riego anual		
Agricultura de riego anual y permanente		
Agricultura de riego anual y semipermanente		
Agricultura de riego semipermanente		
Agricultura de riego semipermanente y permanente		
Agricultura de temporal anual		
Agricultura de temporal anual y permanente		
Agricultura de temporal anual y semipermanente		
Agricultura de temporal semipermanente		
Agricultura de temporal semipermanente y permanente		

Cuadro 9-1. Clasificación completa del INEGI y correspondencia con las clases agregadas que ha preparado CONAFOR para reportar ante el IPCC. También se muestra la correspondencia, aproximada, con la tipología de la IUCN

Continúa

INEGI	CONAFOR-IPCC-N3	IUCN Global Ecosystem Typology
Agricultura de humedad permanente	Cultivos permanentes	T7.1 Croplands
Agricultura de humedad semipermanente		
Agricultura de humedad semipermanente y permanente		
Agricultura de riego permanente		
Agricultura de temporal permanente		
Urbano/construido	Asentamientos humanos	T7.4 Urban and infrastructure lands
Zonas urbanas		
Bosque cultivado	Bosque cultivado	T7.3 Plantations
Bosque de ayarín	Bosque de coníferas	T2.1 Boreal and montane needle-leaved forest and woodlands
Bosque de cedro		
Bosque de táscate		
Bosque de pino		
Bosque de pino-encino		
Bosque de oyamel		
Matorral de coníferas		
Bosque de encino	Bosque de encinos	T2.2 Temperate deciduous forests and shrubland
Bosque de encino-pino		
Bosque mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña	T2.4 Warm temperate rainforests
Mezquital tropical	Selva caducifolia	T1.2 Tropical/subtropical dry forests and scrubs
Matorral subtropical		
Selva baja caducifolia		
Selva baja caducifolia espinosa		
Selva mediana caducifolia		
Selva baja subcaducifolia	Selva subcaducifolia	
Selva mediana subcaducifolia		
Selva alta perennifolia	Selva perennifolia	T1.1 Tropical/subtropical lowland rainforests
Selva alta subperennifolia		
Selva baja perennifolia		
Selva baja espinosa subperennifolia		
Selva baja subperennifolia		
Selva mediana perennifolia		
Selva mediana subperennifolia		

Cuadro 9-1. Clasificación completa del INEGI y correspondencia con las clases agregadas que ha preparado CONAFOR para reportar ante el IPCC. También se muestra la correspondencia, aproximada, con la tipología de la IUCN Continúa

INEGI	CONAFOR-IPCC-N3	IUCN Global Ecosystem Typology
Matorral crasicaule	Matorral xerófilo leñoso	T3.1 Seasonally dry tropical shrublands
Matorral espinoso tamaulipeco		
Mezquital xerófilo		
Chaparral		
Matorral rosetófilo costero		
Matorral sarcocaule		
Matorral sarco-crasicaule		
Matorral submontano		
Matorral sarco-crasicaule de neblina		
Matorral desértico micrófilo	Matorral xerófilo no leñoso	T5 Deserts and semideserts
Matorral desértico rosetófilo		
Vegetación de desiertos arenosos		
Vegetación halófito xerófila		
Bosque de galería	Vegetación hidrófila leñosa	FT1 Palustrine wetlands
Selva de galería		
Vegetación de galería		MFT1 Brackish tidal systems
Petén		
Manglar		
Bosque de mezquite	Otros tipos de vegetación leñosa	T1 Tropical-subtropical forests
Palmar natural		
Palmar inducido		
Bosque inducido		
Pastizal cultivado	Pastizal	T7.1 Sown pastures and old fields
Pastizal halófilo		T4 Savannahs and grasslands
Pastizal inducido		
Pastizal natural		
Pastizal gipsófilo		
Sabana		
Vegetación sabanoide		
Pradera de alta montaña		T6.5 Tropical alpine meadows and shrublands

Cuadro 9-1. Clasificación completa del INEGI y correspondencia con las clases agregadas que ha preparado CONAFOR para reportar ante el IPCC. También se muestra la correspondencia, aproximada, con la tipología de la IUCN **Concluye**

INEGI	CONAFOR-IPCC-N3	IUCN Global Ecosystem Typology
Popal	Vegetación hidrófila no leñosa	FT1 Palustrine wetlands
Vegetación hidrófila halófila		
Tular		
Vegetación de dunas arenosas	Otros tipos de vegetación no leñosa	TM2.1 Coastal shrublands and grasslands
Área desprovista de vegetación	Otras tierras	N/A
Sin vegetación aparente		

9.2 Propuesta para la interoperabilidad de la información ecológica disponible en México en el marco del proyecto NCAVES

Una contribución positiva del proyecto NCAVES y del SEEA EA ha sido la generación de mecanismos que faciliten la interoperabilidad necesaria para poder considerar los intereses de los diferentes usuarios. En este contexto, esta propuesta es una contribución concreta a este impulso. Así, se desarrolló un recurso computacional enfocado a la pregunta, ¿qué tanto comparten entre sí las distintas clasificaciones? Sabemos que cabe esperar una alta correspondencia entre ellas, pero será posible determinar directamente, ¿cuál es la correlación que existe entre ellas?, y con más exactitud, ¿cómo son los patrones específicos de correspondencia entre las clases representadas? Para abordar estas inquietudes recurriendo a herramientas del campo de la llamada *inteligencia artificial*, la solución que construimos busca esclarecer vínculos y operar a través de los múltiples conceptos e intenciones de uso que quedan embebidos en las distintas formas de catalogar aspectos ecosistémicos de la geografía.

La propuesta presentada aquí se basa en la familia de modelos estadísticos denominada *redes bayesianas* o *redes de influencia*. Se trata de modelos que se han utilizado en el ámbito de la *inteligencia artificial* y han demostrado ser muy exitosos como dispositivos de cómputo que podrían asemejar modalidades de razonamiento humano en cuanto a inferencia y deducción. La modelación basada en redes bayesianas es una herramienta matemática ideada por Pearl (1988), como un formalismo que permite desarrollar modelos intuitivos, versátiles y potentes. Las redes bayesianas se han utilizado exitosamente en una amplia gama de aplicaciones que comprenden predicción, detección de anomalías, diagnóstico, percepción automatizada, razonamiento, predicción a lo largo del tiempo y toma de decisiones bajo incertidumbre. En general, son propicios para hacer uso ponderado de distintas fuentes de información, de modo que se optimice la formulación, probabilística, de conclusiones. Un último aspecto importante es que la construcción del modelo puede ser apoyada en gran medida por los datos de que dispongamos, lo que abre la posibilidad de desarrollar enfoques de modelación numérica impulsados por datos, en complemento a los impulsados por juicio experto y modelos teóricos.

9.2.1 Redes bayesianas

Una red bayesiana se define como un modelo gráfico o modelo probabilístico gráfico (en econometría hay referencias a esto bajo el concepto de análisis causal y *do-calculus*). Un modelo gráfico hace referencia a modelos que se asocian con estructuras que forman un grafo, que no es otra cosa que una representación del patrón de cómo un conjunto de variables influye uno sobre otro. En el grafo, las variables se representan como *nodos* y la influencia, mediante líneas o *arcos*. La colección de nodos y arcos es una representación gráfica cualitativa de cómo es que se concibe que unas variables influyen sobre otras (causalmente o mediante el aporte de información o *evidencia*). A esta representación gráfica también se le llama la *topología del sistema*. Constituye el mapa cualitativo de este. En las redes bayesianas se exige que la influencia entre las variables sea direccional (representado por flechas que sugieren el destino de la influencia) y que no haya circuitos de retorno hacia ninguno de los nodos presentes en el grafo. Este tipo específico de estructura topológica se denomina *gráfico acíclico dirigido* (GAD, siglas en español, pero más comúnmente se usan en inglés DAG, *Directed Acyclic Graph*). A veces inquieta el que estas representaciones no toleren circuitos de realimentación, pero esto no es necesariamente así, si se considera que, en una cadena causal, el tiempo genera la posibilidad de tener *copias* de la topología que pueden entonces incluir nodos repetidos que se influyen a través del tiempo.

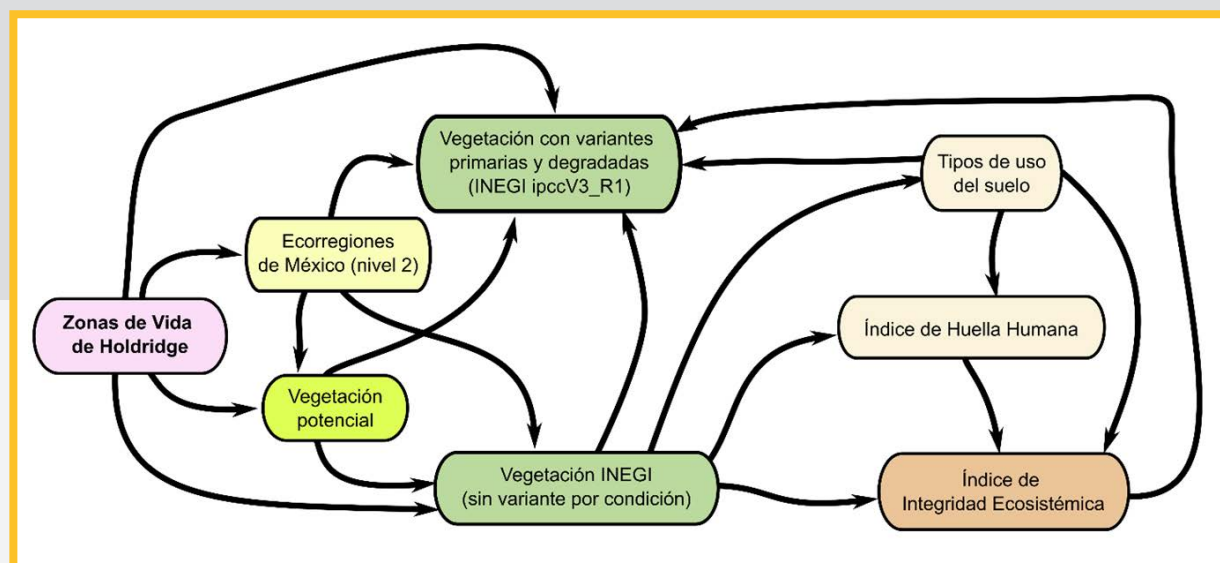
Una red bayesiana incluye, además, un componente cuantitativo. Lo hace mediante una tabla que se forma con los valores de probabilidad condicional que definen al nodo y forma la tabla de probabilidad condicional (TPC, es una especie de tabla cruzada) del nodo. Esta tendrá tantas entradas como variables confluyan en un nodo. Cada entrada en la tabla corresponde a algún tipo de *respuesta del nodo* condicionada a la información que se le proporcione. A partir de estos dos ingredientes: 1) cualitativo mediante la topología del grafo y 2) cuantitativo a través de la tabla de probabilidad condicional. El modelo puede hacer cálculos en los que combina los valores de probabilidad que se generan a partir de datos (evidencia) que se les proporcionen a algunos nodos para estimar el estado que cabría esperar en otros nodos de interés. Una red bayesiana es siempre una descripción de la distribución de probabilidades conjunta del sistema que se está modelando. Esto genera formas de *razonamiento* en la terminología de la inteligencia artificial, que no son otra cosa que distintas maneras de combinar piezas de evidencia para calcular el estado más probable que tendría la red en su conjunto, al disponer de la información que se le proporcione. Con tal dispositivo se dispone de un medio eficaz para traducir *contextualmente* las equivalencias entre clasificaciones.

9.2.2 Modelación de interacciones entre datos socio-ecológicos

La red bayesiana, que hemos construido para analizar la correspondencia entre las distintas clasificaciones, su interacción con indicadores de influencia humana y su relación con el Índice de Integridad Ecosistémica (medida de la condición), incorporó los siguientes componentes, como se ilustra en la figura 9-1:

- Ecorregiones de México (nivel 2, variable con 24 niveles).
- Índice de Huella Humana (variable continua entre 0 y 10 discretizada a cinco niveles).
- Índice de Integridad Ecosistémica (variable continua entre 0 y 1 discretizada a cinco niveles).
- Tipo de uso del suelo (variable con siete clases).
- Vegetación INEGI (según clasificación CONAFOR-IPCC-N3, variable con 32 clases).
- Vegetación INEGI reducida (variable con 16 clases).
- Vegetación potencial (variable con 10 clases).
- Zonas de vida de Holdridge (variable con 28 clases).

Figura 9-1. Estructura de la red sobre interoperabilidad de representaciones ecológicas y de uso



Entrenamiento de la red a partir de datos.

Todo el procesamiento de la red bayesiana se hizo con la aplicación Netica® de Norsys. Esta red fue *entrenada* (ajustada) proporcionando datos de todas las variables contenidas en el grafo. Se aplicó el algoritmo de *aprendizaje* por conteo (*counting-learning* en Netica®). Se trata de un método relativamente simple, pero apegado a la lógica del cálculo bayesiano de probabilidades. En términos generales, el algoritmo inicia con una red equiprobable, es decir, en un estado completo de *ignorancia*. En forma de secuencia se van alimentando casos, que son colecciones de datos con valores específicos para cada una de las variables (colecciones que pueden ser completas o no, según se disponga de datos). Cada caso se analiza para encontrar de qué nodos aporta datos y sobre si aporta también información de todos los nodos de los que dependen esos nodos, en cuyo caso se hacen los cálculos necesarios para actualizar las probabilidades en los nodos pertinentes de la red. Como puede verse, el proceso puede describirse como un proceso de *aprendizaje* y de ahí la terminología de *entrenamiento* que se usa ampliamente en el campo de la inteligencia artificial.

Los datos utilizados para el entrenamiento se obtuvieron de la cartografía digital que se ha reunido para el proyecto SEEA. Se trata en todos los productos en formato *raster* con un tamaño de pixel de 250 m por lado. Esto hace que las bases de datos que se procesaron se asocian, cada una, con tablas que contienen 30 470 057 registros. Esto hace un total de 457 050 855 casos procesados en el caso de la red propuesta. La vegetación de referencia utilizada fue la

de la serie VI; el Índice de Huella Humana, de 2014; y el Índice de Integridad Ecosistémica, de 2018. Las coberturas de zonas de vida de Holdridge, ecorregiones (nivel 2) y vegetación potencial corresponden a productos que no hacen referencia al tiempo, sino de contexto.

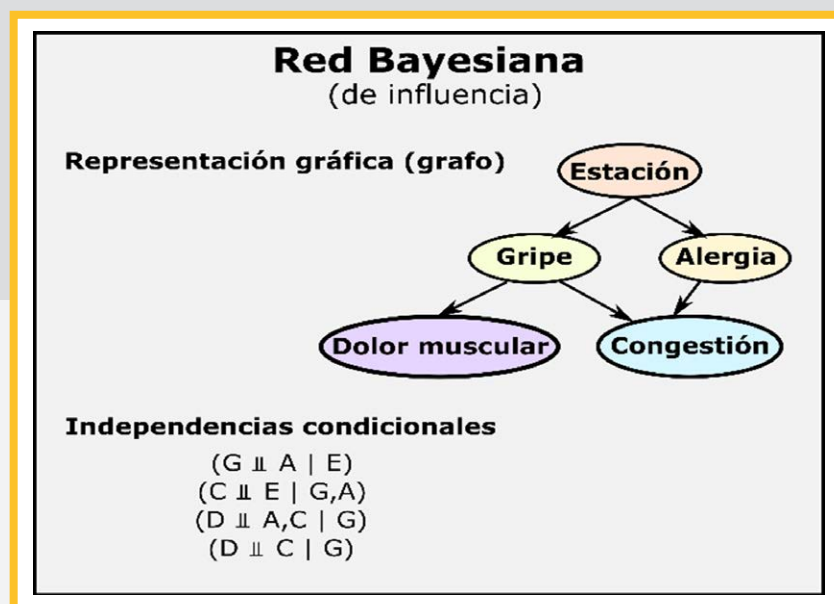
9.2.3 Patrones de asociación entre las categorías mapeadas

La estructura del grafo o DAG se vincula con los patrones de flujo de influencia y de información. Esto se manifiesta en estructuras en la red que se pueden caracterizar a través del concepto de *independencia* en términos de probabilidad. Un aspecto importante de la estructura de un DAG es que al mismo tiempo que se construye a partir de las relaciones que se infiere, existen en el sistema que se analiza; también, implica la existencia de patrones de independencia y, especialmente, de independencia condicional, que dan cuenta de la ausencia de influencias específicas (por información o causalidad), entre componentes del sistema. Por ejemplo, en la figura 9-2 se ilustra un DAG que contrasta la relación entre *gripe* y *alergia* (fiebre del heno), que se vinculan con la estación del año y sus síntomas en una persona. De la estructura de relaciones planteada, pueden deducirse también las deducciones o implicaciones que no pueden hacerse, pues se relacionan con combinaciones de variables que resultan independientes. Así, en el DAG de gripe-alergia se implica, si se parte del dato de la estación del año en la que se está viviendo, la *gripe* y la *alergia* se separan, es decir, son condicionalmente independientes a la información sobre la estación. También, se puede ver que, si se diagnostica a alguien con gripe y alergia, deja de ser informativo el dato sobre la estación del año para explicar la presencia de congestión nasal en un paciente, se implica independencia condicional entre *estación del año* y el síntoma *congestión*. Este potencial de los DAG para analizar los patrones de inferencia que están implícitos en la estructura cualitativa planteada es la base de la formulación de mecanismos de inferencia o *razonamiento* a partir de datos (evidencia).

Podemos ver en la figura 9-3 un análisis de independencia condicional para la red que hemos construido. Encontramos 15 instancias de independencia que implican el patrón de influencia que hemos identificado. Algunos ejemplos de interpretación de lo que sugieren estas expresiones de independencia condicional son los siguientes:

1. Si se dispone de información de la tabla de vegetación modificada (reducida) y datos del tipo de uso que se hace de los ecosistemas, se independizan zona de vida y el Índice de Huella Humana ($Z \perp\!\!\!\perp hH \mid U, VR$). Esto sugiere, por ejemplo, que al combinar los datos de *vegetación modificada* y *tipo de uso* (el equivalente a la clasificación original de vegetación de CONAFOR IPCC-N3) se cuenta con información suficiente para caracterizar el estado esperado del Índice de Huella Humana sin requerir datos de zona

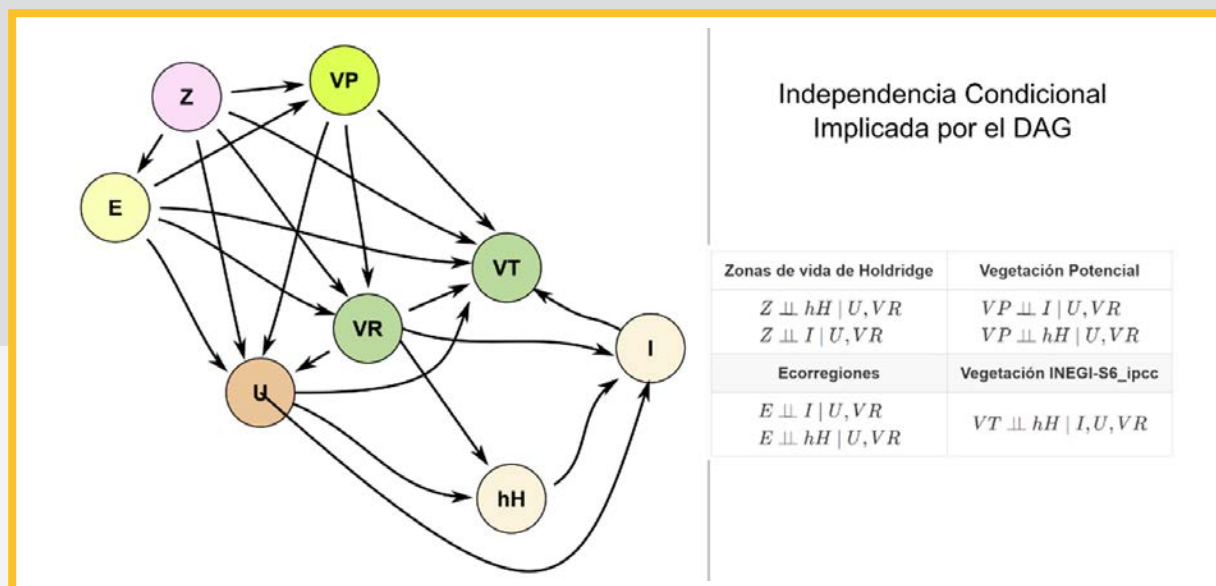
Figura 9-2. Ejemplo de DAG básico y los patrones de independencia que implica el grafo



de vida. También ocurre al contrario, es decir, al contar con datos de *vegetación modificada*, el Índice de Huella Humana, en particular, no aporta información para determinar qué zona de vida es más probable que esté implicada, dado el resto de los datos en la red.

2. Si se cuenta con datos del Índice de Integridad Ecosistémica, uso del suelo y vegetación modificada, el Índice de Huella Humana se hace independiente de la tabla de vegetación original ($VT \perp\!\!\!\perp hH \mid I, U, VR$). Esto sugiere que la configuración esperada de la tabla de vegetación completa no utilizará información del Índice de Huella Humana, si se tiene información simultáneamente del Índice de Integridad Ecosistémica y de las tablas simplificadas que elaboramos sobre uso del suelo y vegetación modificada (además de los datos del resto de nodos que pudiera haber).

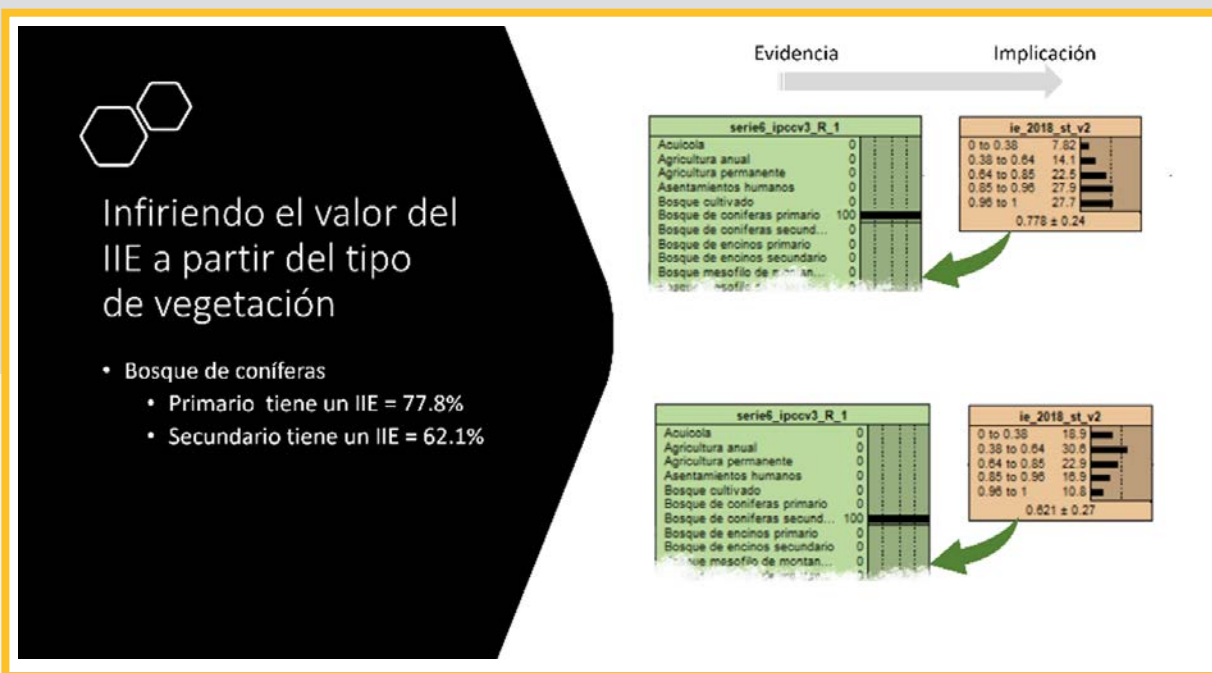
Figura 9-3. Análisis de independencia condicional que implica el grafo asociado con la red que hemos desarrollado para la interoperabilidad de categorías



9.2.4 Inferencias a partir de la red bayesiana

A partir de la información contenida en los nodos, y de acuerdo con los patrones de flujo de información que describimos en la sección anterior, se pueden realizar distintos procesos de inferencia. En la literatura del *aprendizaje automatizado*, el modelo se puede utilizar para generar distintos tipos de razonamiento automatizado. Por ejemplo, en la figura 9-4 se muestra que si en la tabla de *vegetación completa* se proporciona el dato de que se tiene vegetación secundaria de *bosque de coníferas*, el motor bayesiano de inferencia nos sugiere que la integridad ecosistémica cabría esperar tenga una gama de valores que se aproximaría a la distribución de probabilidades que se muestra en la figura, en la que podemos ver que el valor más probable (el promedio) sería de 62.1 por ciento. Si, por el contrario, el dato que alimentamos a la red es el de vegetación primaria del mismo tipo de bosque, entonces encontramos que el valor más probable es de 77.8 por ciento. Se debe considerar que estos resultados aplican a la distribución general del tipo de vegetación en todo el territorio nacional, pues el modelo fue *entrenado* con esos datos.

Figura 9-4. Ejemplo de *razonamiento deductivo* a partir del modelo bayesiano propuesto



Se analiza la inferencia del valor de integridad promedio que se asocia con el tipo de vegetación *bosque de coníferas* en sus variantes *primaria* y *secundaria*.

En el cuadro 9-2 se ha resumido la exactitud (varios índices incluyendo el porcentaje de clases correctamente identificadas en el caso de variables discretas), para cada uno de los nodos, considerando que se alimenta a la red información para todos los nodos (excepto el de interés, claro está).

Como se esperaba, los resultados muestran que no hay correlación perfecta entre las variables y que tampoco se logra una correspondencia perfecta a través de la red para ninguna de las variables. Los valores de correspondencia son altos en general, lo que sugiere un buen desempeño del modelo. El peor caso en la búsqueda de correspondencia resultó ser el nodo de zonas de vida de Holdridge. Esto cabría ser esperado, pues en la estructura de la red se ubica como un nodo *origen*, de modo que hay relativamente pocas fuentes de evidencia que permitan inferir su estado. Aun así, la red predice al menos dos veces mejor que una elección completamente aleatoria. Los resultados obtenidos también sugieren que los distintos productos no son realmente intercambiables y refuerzan la idea, como planteamos al inicio, de una importante complementariedad entre ellos.

Cuadro 9-2. Tasa de Error es el porcentaje de casos clasificados erróneamente por la red

Variable	Tasa de Error	Pérdida Logarítmica	Pérdida Cuadrática	Pago Esférico	Coeficiente de Correlación de Matthews	Error Cuadrático Medio (rms)
Ecorregiones (nivel 2)	30.26	0.858	0.4108	0.75	0.65	
Huella Humana [0-10] (2014)					0.39	2.18
Índice de Integridad Ecosistémica [0-1] (2018)					0.34	0.17
Tipos de uso	0.01	0.001	0.0002	1.00	1.00	
Vegetación (S6_IPCC-V3.R1)	10.45	0.250	0.1519	0.92	0.88	
Vegetación potencial	20.85	0.539	0.2973	0.83	0.73	
Vegetación reducida	0.05	0.004	0.0010	1.00	1.00	
Zonas de vida de Holdridge	46.06	1.194	0.5826	0.63	0.49	

La proximidad a 0 de los índices Pérdida Logarítmica (0-inf) y Pérdida Cuadrática (0-2) sugiere mejor desempeño. En el Índice Pago Esférico (0-1), el desempeño mejor lo sugiere la cercanía a 1. Coeficiente de Correlación de Matthews (-1 a 1). Error Cuadrático Medio en las unidades de medición, la cercanía a 0 sugiere mejor desempeño.

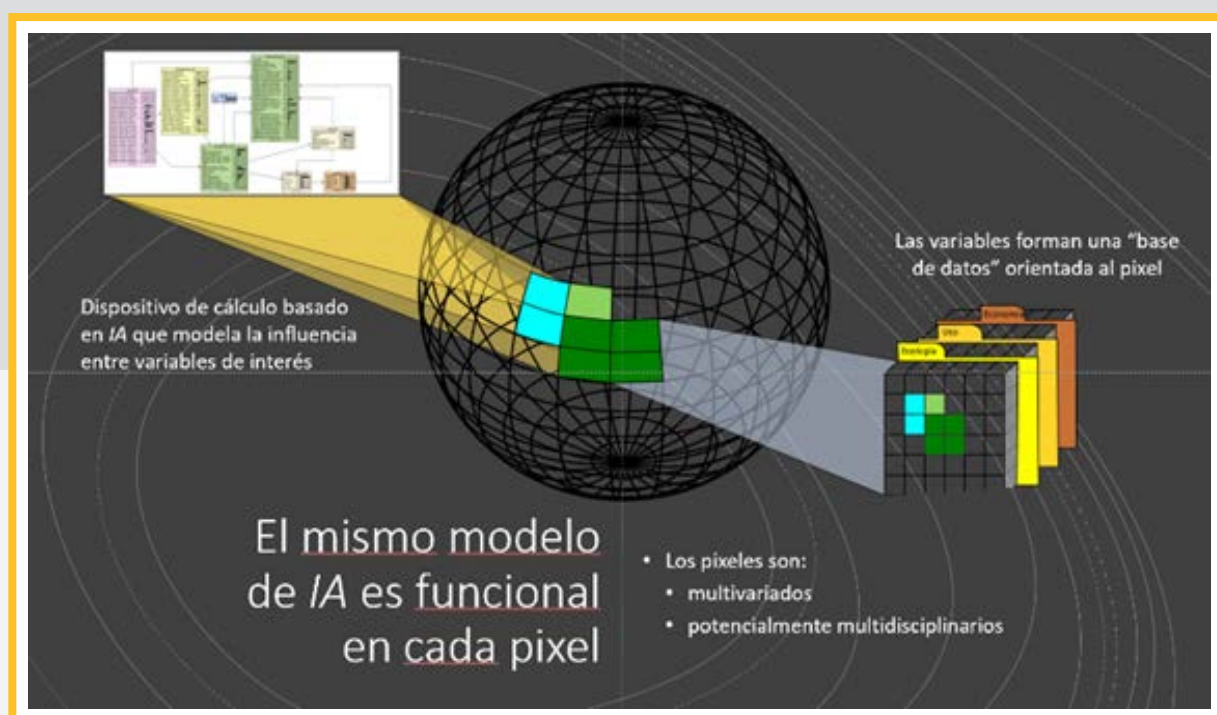
9.2.5 Interoperabilidad de los datos socio-ecológicos

La red que hemos construido busca ser un apoyo para facilitar, de la mejor manera posible, el uso de distintas formas de describir el escenario ecológico y los factores socio-ecosistémicos identificados, que están en operación en el espacio. Observamos que es posible generar interpretaciones razonables de las distintas combinaciones de variables y que el mecanismo de cómputo permite enriquecer la interpretabilidad de los resultados que el SEEA está produciendo. Esto es valioso, pues facilita la asimilación de los resultados y amplía su potencial de generar información útil para la toma de decisiones.

El proyecto NCAVES hizo posible la construcción de una base de datos piloto constituida por una colección de productos cartográficos homogeneizados en cuanto a sus atributos de proyección, extensión y resolución espaciales. Esta base de datos espacialmente explícita se vincula de manera eficiente con la red bayesiana que hemos construido y en conjunto se convierte en una interesante fuente de consulta. Para hacerlo, se cuenta con el valor agregado

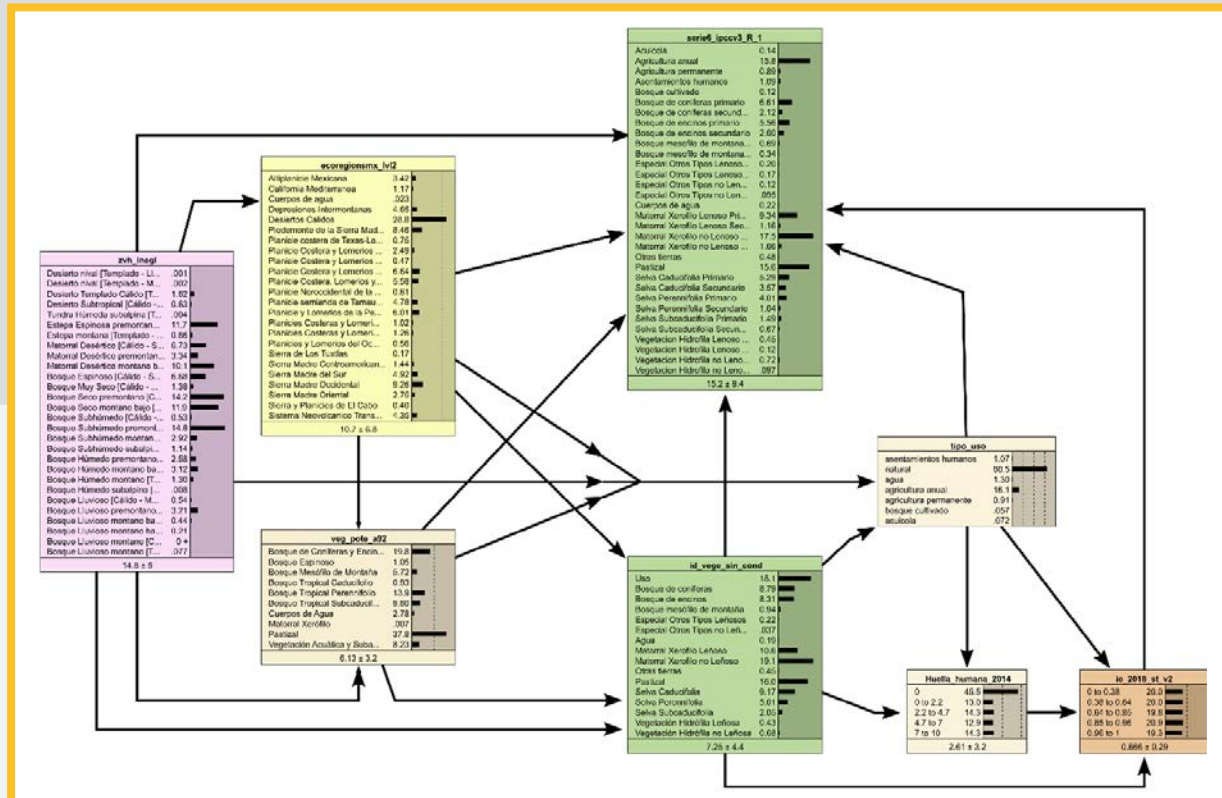
de poder utilizar las capacidades de *razonamiento automatizado* que hemos descrito con anterioridad. Esta forma de aproximarse al desafío que plantea el SEEA tiene un gran potencial de desarrollo pues, como hemos visto, la base teórica de construcción de este tipo de modelos permite la confluencia de la experiencia de múltiples disciplinas, en este caso desde la ecología hasta la economía. Hay experiencias exitosas en el uso del enfoque basado en *grafos acíclicos dirigidos* en todos los campos de interés del SEEA, y el desarrollo que reportamos aquí demuestra su potencial integrativo.

Figura 9-5. Concepto de integración de datos geospaciales del SEEA



Se trata de coberturas geográficas en formato *raster* uniformes, de 250 m, con datos de proyección y extensión congruentes. Así, cada pixel puede imaginarse como una pila de variables.

Figura 9-6. Estado basal o a priori de la red bayesiana propuesta



Los valores que aparecen son básicamente la proporción de *pixeles* bajo cada condición de acuerdo con el nodo de que se trate.

Una impresión general del estado de las variables y sus relaciones resulta de la inspección de la red bayesiana de atributos ecológicos y de uso humano propuesta se puede apreciar en la figura 9-6. Entre las primeras impresiones interesantes que muestra claramente la red está el patrón de distribución de atributos ecosistémicos en México, así como las variantes de uso del territorio nacional. Es el *estado basal* de la red y es un resumen de la frecuencia con la que aparecen cada uno de los atributos en México. La zona de vida más frecuente en México es el bosque subhúmedo premontano [cálido-lluvioso] (14.8 % del territorio); la ecoregión más amplia son los desiertos cálidos (28.8 %); la vegetación potencial más frecuente son los pastizales (37.8 %); el tipo de vegetación más abundante es el matorral xerófilo no leñoso (19.1 %) y, además, en su variante primaria (16.9 %). Un gran porcentaje del territorio nacional tiene vegetación natural (80.6 %), lo cual etiquetamos como *natural* en el nodo de uso del suelo. Esto se relaciona con un Índice de Huella Humana global de alrededor de 26 % y un Índice de Integridad Ecosistémica de 67 por ciento.

Otro ejemplo de preguntas que se le pueden plantear a la red que hemos construido sería, ¿cómo está desplegada la agricultura de cultivos anuales sobre el escenario ecológico de México? Esto, incluso, incluye la asociación con el indicador de condición ecosistémica. El resultado se ilustra en la figura 9-7. Puede verse que esos territorios reportan, en promedio, un Índice de Huella Humana de alrededor de 67 % y un Índice de Integridad Ecosistémica de 45 por ciento. Las unidades ecológicas donde predominantemente se ha establecido este tipo de agricultura en México son las zonas semiáridas y, desde luego, también está muy asociada a espacios forestales tropicales y templados. El resto de los tipos de uso puede verse en la figura 9-8.

Figura 9-7. Efecto de consultar sobre un razonamiento deductivo en cuanto a qué ocurre con el despliegue de la agricultura anual en México

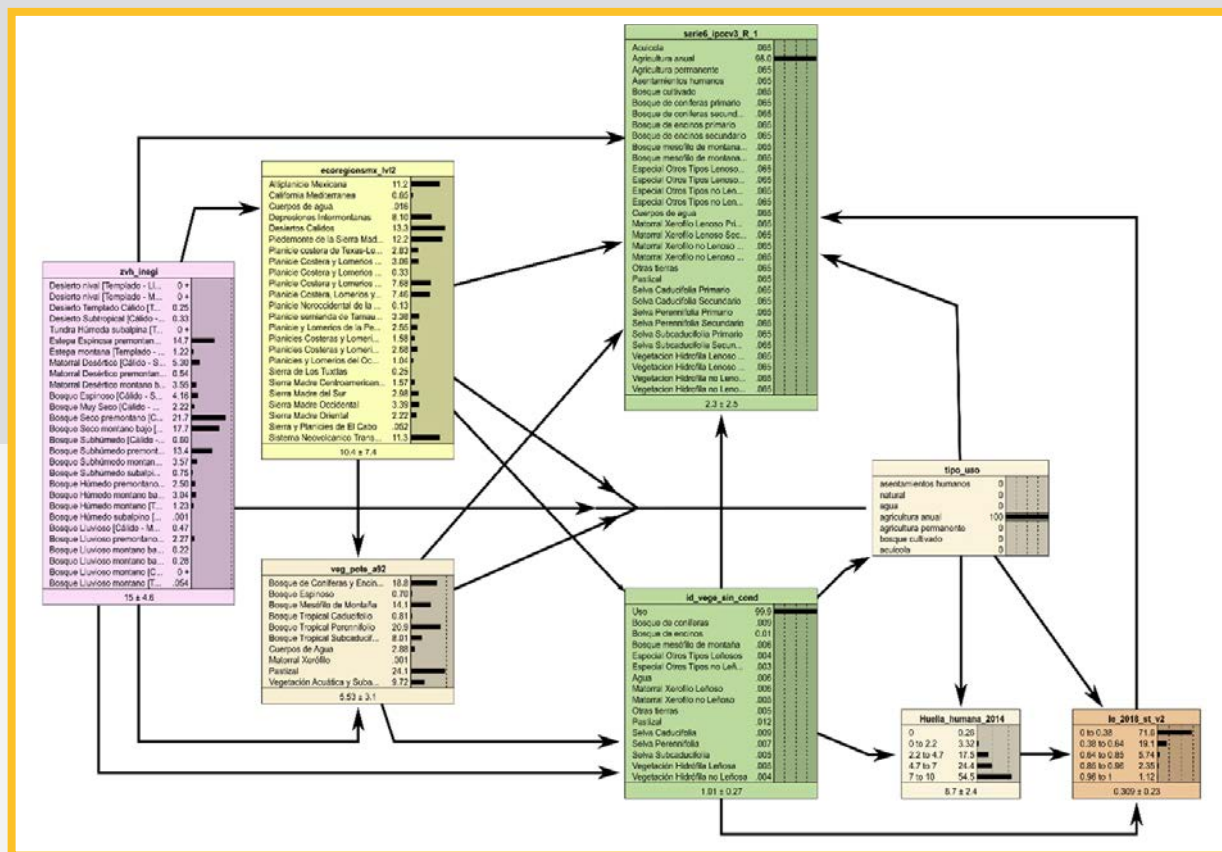
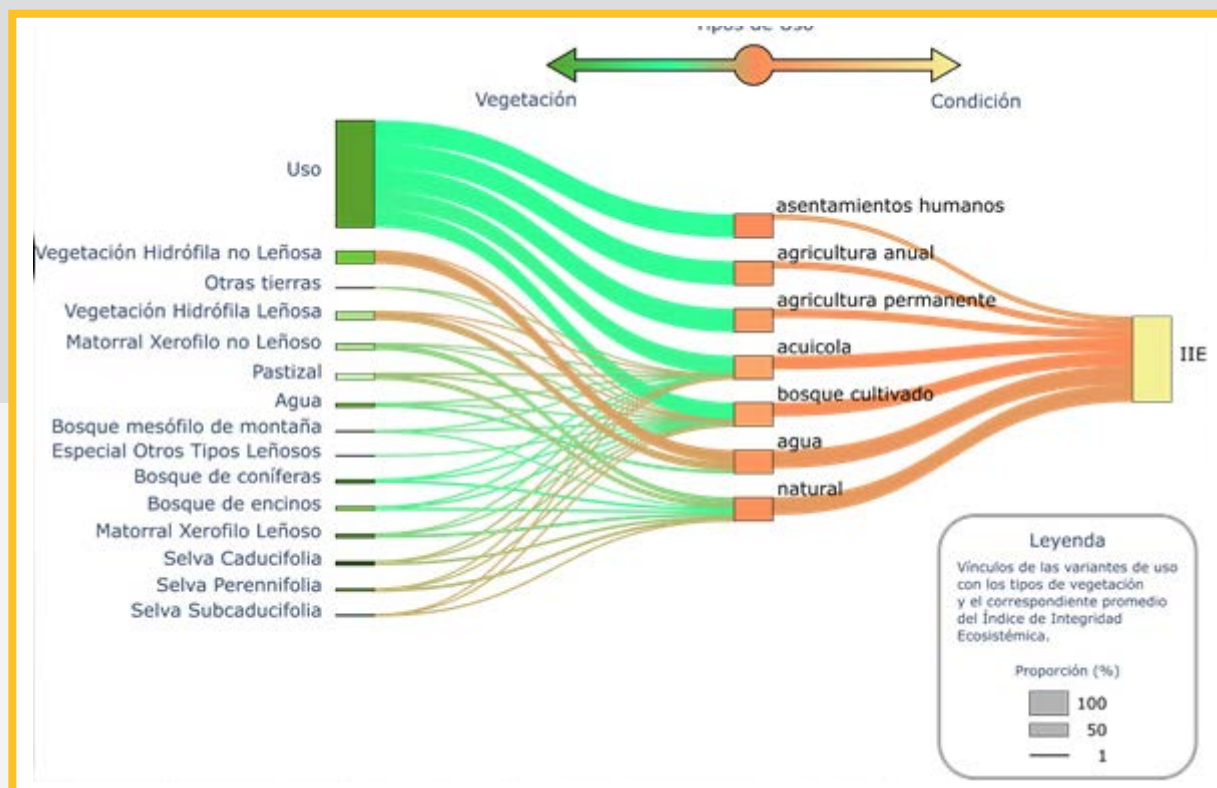


Figura 9-8. Patrón de interacción entre los nodos de la red cuando se analiza el efecto de los varios tipos de uso



Preguntas como estas o más complejas, involucrando varias piezas de evidencia simultáneamente, pueden ser planteadas a la red. También, es posible formularse consultas a partir de datos específicos de píxeles de la geografía nacional y, entonces, el resultado puede ser expresado en forma cartográfica. Como se aprecia, el potencial es enorme.

9.3 Análisis de cambios en la extensión de los ecosistemas a nivel nacional por periodos intermedios

En el periodo 2002-2007, los cambios entre usos del suelo muestran un intercambio dinámico entre cultivos anuales y permanentes y la urbanización sucede, principalmente, por la conversión de agricultura anual. La conversión afecta, sobre todo, a las selvas, donde destaca la selva caducifolia, por campos de agricultura anual, seguida por la agricultura perenne y la urbanización. Otros ecosistemas afectados por conversión son los bosques de coníferas y de encino, vegetación especial leñosa, matorral leñoso, con la agricultura anual como receptora de estas regresiones. En bosque de coníferas y bosque mesófilo también los cultivos son importantes conductores de cambio. La conversión del matorral xerófilo no leñoso es casi tres veces más extensa que para el matorral xerófilo leñoso. En las selvas perennifolia y subcaducifolia, la conversión es menos extensa que en los bosques. En los matorrales, la urbanización es más importante como conductor de conversión que en los bosques. La conversión de pastizal en campos agrícolas es casi 10 veces más grande que la conversión de los bosques. Para estos, se observa un intercambio intenso entre conversión y regeneración natural, igual que para especial leñosos y vegetación hidrófila leñosa. Para el resto de la vegetación natural, los espacios afectados por conversión alcanzan, al menos, el doble de extensión que lo que podría haberse recuperado por regeneración natural (cuadro 9-3)

En el siguiente periodo analizado (2007-2011), los cambios entre usos del suelo muestran un intercambio entre agricultura anual y perenne, aunque menos intenso que en el periodo anterior. Predomina la transición de agricultura anual a perenne. Respecto a la conversión, la extensión de conversión para la selva caducifolia se reduce a menos de la mitad, mientras que para la selva perennifolia aumenta y, también, lo hace en el caso de la selva subcaducifolia. Asimismo, se observa una disminución de la conversión que afecta al bosque de encino, pero es menor que la que se presenta en el bosque de coníferas y especial leñoso. Ocurre lo contrario en el bosque mesófilo, pues en este caso la conversión aumenta. Para el matorral leñoso aumenta la conversión, mientras que para el matorral no leñoso disminuye. La conversión disminuye cuatro veces para la vegetación hidrófila leñosa y se mantiene constante para la vegetación no leñosa. La conversión de pastizal en agricultura anual sigue ocurriendo, aunque menos que en el periodo anterior, pero aumenta la urbanización a costa del pastizal (cuadro 9-4). La regeneración natural disminuye en el bosque mesófilo y para especial leñoso, mientras que aumenta en el matorral xerófilo leñoso y no leñoso, selva caducifolia y vegetación hidrófila no leñosa. De manera general, se mantienen los mismos impulsores de cambio.

Cuadro 9-3. Matriz de cambio para el periodo 2002 (filas)-2007 (columnas) con el área de las transiciones en km²

2007 Serie IV 2002 Serie III	Ecosistemas antrópicos										Ecosistemas Naturales Terrestres										Total extensión de apertura 2002 (Serie III)		
	Acuicola	Agrícola Anual	Agrícola Perenne	Asentamientos	Bosque Cultivado	Bosque de Coníferas	Bosque de Encino	Bosque Mesófilo de Montana	Especial Otros Tipos Leñoso	Especial Otros Tipos No Leñoso	Matorral Xerófilo Leñoso	Matorral Xerófilo No Leñoso	Otras Tierras	Pastizal	Selva Caducifolia	Selva Perennifolia	Selva Subcaducifolia	Vegetación Hidrófila Leñoso	Vegetación Hidrófila No Leñoso	Agua	Ajustes	Total extensión de apertura 2002 (Serie III)	
Acuicola	614	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NA	0	683
Agrícola Anual	12 273,720	835	1,682	11	1,720	1,563	114	125	2	972	1,574	31	6,138	3,602	489	387	138	152	NA	NA	NA	1	293,268
Agrícola Perenne	1 707 14,383	149	4	4	109	12	25	0	2	3	3	6	564	155	71	19	19	8	NA	NA	NA	0	16,239
Asentamientos	0	93	5	12,500	2	2	4	0	0	1	5	14	1	15	5	6	2	2	0	NA	NA	0	12,657
Bosque Cultivado	0	10	0	1 302	0	0	4	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	NA	NA	0	322
Bosque de Coníferas	0	1,743	89	21	1 162,416	2,098	282	0	0	9	9	1	1,715	231	9	48	0	0	NA	NA	NA	0	168,673
Bosque de Encino	0	1,744	16	13	2,223 147,711	121	121	57	0	57	9	9	2,407	1,764	57	156	8	0	NA	NA	NA	0	156,366
Bosque Mesófilo de Montana	0	98	81	1	0	220	30 17,611	0	0	0	0	0	174	3	31	2	0	0	NA	NA	NA	0	18,252
Especial Otros Tipos Leñoso	0	169	0	4	0	0	44	0	3,827	0	61	29	1	74	61	0	3	2	2	NA	NA	0	4,279
Especial Otros Tipos No Leñoso	4	1	3	16	0	0	0	0	0	1,507	5	4	4	4	1	0	0	13	1	NA	NA	0	1,562
Matorral Xerófilo Leñoso	56	1,624	28	296	0	14	47	0	21	6 207,116	589	37	1,470	97	0	0	44	17	NA	NA	0	211,462	
Matorral Xerófilo No Leñoso	75	4,906	29	249	0	71	214	0	72	4	346 362,337	272	1,652	0	0	0	85	5	NA	NA	1	370,318	
Otras Tierras	33	36	20	12	0	1	3	0	0	8	7	60 9,150	88	4	7	1	34	22	NA	NA	9	9,493	
Pastizal	21	12,882	794	624	32	1,311	2,667	143	115	2	635	2,664	176 285,044	3,737	3,154	646	194	416	NA	NA	0	315,257	
Selva Caducifolia	7	6,053	250	221	2	201	1,500	3	54	2	75	191	36	4,637	165,863	90	363	75	20	NA	NA	0	179,643
Selva Perennifolia	0	1,304	238	184	4	16	88	44	0	0	0	0	5	4,716	139	98,028	267	55	134	NA	NA	0	105,222
Selva Subcaducifolia	0	1,199	41	42	4	54	257	86	1	0	0	0	1	1,530	1,122	718 42,494	30	20	NA	NA	0	47,599	
Vegetación Hidrófila Leñoso	11	114	11	11	0	0	5	0	0	10	27	21	6	45	23	34	28 10,678	265	NA	NA	2	11,290	
Vegetación Hidrófila No Leñoso	76	272	13	20	0	0	2	0	4	2	5	18	6	482	37	140	3	300 12,900	NA	NA	NA	0	14,278
Agua	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	27,548	
Ajustes	0	1	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-7	1,964,402
Total extensión de cierre 2007 (Serie IV)	909	306,675	16,840	16,045	374	168,358	156,248	18,430	4,276	1,544	209,323	367,585	9,742	310,759	176,845	102,838	44,420	11,680	13,964				

Las cifras en gris representan los cambios no plausibles; las filas, el tiempo 1; y las columnas, el tiempo 2; de tal manera que la cantidad en cada celda significa la cantidad que pasó de una categoría del tiempo 1 (fila) a otra categoría en el tiempo 2 (columna). Las celdas blancas en diagonal representan las permanencias de cada categoría.

Cuadro 9-5. Matriz de cambio para el período 2011 (filas)-2014 (columnas) con el área de las transiciones en km²

2014 Serie VI 2011 Serie V	Ecosistemas antrópicos					Ecosistemas Naturales Terrestres															Total extensión de apertura		
	Acuícola	Agrícola Anual	Agrícola Perenne	Asentamientos	Bosque Cultivado	Bosque de Coníferas	Bosque de Encino	Bosque Mesófilo de Montana	Especial Otros Tipos Leñoso	Especial Otros Tipos No Leñoso	Matorral Xerófilo Leñoso	Matorral Xerófilo No Leñoso	Otras Tierras	Pastizal	Selva Caducifolia	Selva Perennifolia	Selva Subcaducifolia	Vegetación Hidrófila Leñoso	Vegetación Hidrófila No Leñoso	Agua	Ajustes	Total extensión de apertura	
2014 Serie VI 2011 Serie V	1,085	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NA	0	1,085	
	5 307,496	188	135	3	83	46	4	1	0	55	1,090	16	174	473	12	29	3	0	0	NA	0	309,811	
	0 38 17,525	14	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	75	10	5	0	0	0	NA	0	17,671	
	0 1 21,397	0	1	121,397	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NA	0	21,400	
	0 0 0	0	0	0	654	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	NA	0	655	
	0 232	64	4	0	167,310	29	0	0	0	0	0	0	3	263	1	0	0	0	0	NA	0	167,905	
	0 96	5	2	5	12 157,985	0	0	0	0	0	0	0	27	207	9	0	2	0	0	NA	0	158,350	
	0 72	31	0	0	8 17,956	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	NA	0	18,105	
	0 19	0	0	0	0	0	0	0	4,168	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	NA	0	4,189	
	3 0	0	8	0	0	0	0	0	0	1,530	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NA	0	1,541	
	6 145	2	32	0	214	3	0	0	0	0	205,515	0	13	245	0	0	0	0	0	NA	0	206,175	
	28 428	5	30	1	0	0	0	0	0	0	1 365,508	6	10	30	0	0	0	0	0	NA	0	366,041	
	5 0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1 10,148	0	0	0	0	0	0	0	NA	1	10,165	
	1 869	296	90	83	200	231	6	1	7	74	0	29 304,047	672	121	226	0	0	0	0	NA	0	306,952	
	4 545	10	53	1	0	2	0	0	0	0	16 1,299	176,864	3	6	0	0	0	0	0	NA	0	178,802	
	0 606	107	24	4	0	0	0	0	0	0	0	9 1,379	0	99,293	0	0	0	0	0	NA	0	101,422	
	0 378	27	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	448	9	2 39,592	0	0	0	NA	0	40,458	
	1 4	3	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	5	0	0	0	11,734	0	NA	0	11,752
18 26	12	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4	7	0	0	0	0	14,276	NA	0	14,345	
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	27,548	-1	-1	
Total extensión de cierre 2014 (Serie VI)																							1,964,368

Las cifras en gris representan los cambios no plausibles; las filas, el tiempo 1; y las columnas, el tiempo 2; de tal manera que la cantidad en cada celda significa la cantidad que pasó de una categoría del tiempo 1 (fila) a otra categoría en el tiempo 2 (columna). Las celdas blancas en diagonal representan las permanencias de cada categoría.

Durante 2011-2014, los cambios entre usos del suelo muestran una disminución del intercambio entre cultivos anuales y se mantiene el patrón de una dominancia de la transición de agricultura anual a perenne. Se observa una disminución de la extensión de la conversión de las selva caducifolia y subcaducifolia (cuatro veces), de la selva perennifolia (tres veces), el matorral no leñoso (siete veces) y de los bosques de coníferas y encino, especial leñoso, matorral leñoso y la vegetación hidrófila leñosa (10 veces, cuadro 9-5). En el bosque mesófilo, la conversión aumenta y la agricultura perenne gana en importancia como impulsor directo del cambio respecto a la agricultura anual. En la vegetación hidrófila no leñosa se mantiene la conversión a un nivel alto. La urbanización de pastizal disminuye 10 veces, pero la conversión en agricultura anual se mantiene casi en el mismo nivel que en el periodo anterior. La regeneración natural disminuye para bosques de coníferas, encino y mesófilo, especial leñoso y vegetación hidrófila leñosa y no leñosa, mientras que aumenta para matorral no leñoso y pastizal. Se mantienen los mismos impulsores de la transformación del paisaje nacional.

9.4 Contabilidad de la extensión de ecosistemas terrestres en México a nivel subnacional (ecorregiones, áreas naturales protegidas, estados de la República Mexicana)

9.4.1 Extensión de ecosistemas en las áreas naturales protegidas en México

La contabilidad de la extensión de ecosistemas en las áreas protegidas (AP) muestra una gran gama de situaciones y tendencias. Algunos muestran una amplia extensión de vegetación natural, mientras que otras están dominadas completamente por formas antrópicas de uso

del suelo. Evaluando los cambios en los últimos 12 años, existen AP con procesos activos de regeneración, sin embargo, son más los que muestran un aumento en conversión por efecto de la ampliación de la agricultura anual, pastizales y, sobre todo, asentamientos humanos. La urbanización, en muchos casos, es el proceso de cambio que tiene las mayores tasas de cambio positivas. Destaca el hecho de que en una gran cantidad de AP que no contaban con asentamientos humanos en el 2002, en el 2014 ya los tienen. También, se muestra una transición más o menos amplia de agricultura anual a pastizales en algunos casos.

Cabe mencionar que, entre los ecosistemas con regresiones, la selva subcaducifolia muestra la mayor merma hasta, incluso, desaparecer por completo en varias ANP entre 2002-2014 (Arrecifes de Xcalak, Playa de Escobilla, Uaymil). Otros tipos de vegetación que muestran una pérdida completa son selva caducifolia (Playa Mexiquillo), vegetación hidrófila leñosa (Arrecife de Puerto Morelos, Playa Piedra de Tlacoyunque, Playa de Puerto Arista), vegetación hidrófila no leñosa (Laguna de Chacahua), bosque de encino (Cerro Mohinora) y especial otros tipos no leñoso (Chamela-Cuixmala, Playa Teopa). En algunas AP también se registra la regresión completa de agricultura anual (Benito Juárez, Molino de Flores Netzahualcóyotl, Playa de Maruata y Colola, Rayón). Otras AP con regresiones importante en agricultura anual son Chan-Kin, Boquerón de Tonalá, El Jabalí y Sierra del Abra Tanchipa. En términos de extensión, las regresiones más importantes son bosque de encino (490 km², C.A.D.N.R. 043 Estado de Nayarit), pastizal (362 km², Mapimí), selva subcaducifolia (265 km², C.A.D.N.R. 043 Estado de Nayarit), selva perennifolia (259 km², Montes Azules), matorral xerófilo leñoso (145 km², Barranca de Metztitlán), pastizal (138 km², Tehuacán-Cuicatlán) y selva subcaducifolia (118 km², Calakmul).

Como muestran los casos contrarios, o sea, la aparición de categorías que no existían en la primera fecha, es necesario revisar a detalle la información, ya que la aparición de nuevos tipos de vegetación en AP es prácticamente imposible en el transcurso de 12 años. Entre los tipos de vegetación que no existían en 2002, pero sí en 2014, está la selva caducifolia (Bala'an K'aax, El Veladero, La Encrucijada), selva subcaducifolia (Sierra Gorda), bosque mesófilo de montaña (Mariposa Monarca, Cerro de Garnica) y otras tierras (Marismas Nacionales Nayarit, Barranca de Metztitlán, Tutuaca). Sin embargo, predomina la aparición de asentamientos (C.A.D.N.R. 001 Pabellón, Sacromonte, La Sepultura, Volcán Tacaná, Huatulco, Bosencheve, Playa de Mismaloya, El Triunfo, El Pinacate y el Gran Desierto de Altar, Nahá, Cascada Agua Azul, Marismas Nacionales Nayarit, Tulum, Sierra Huautla, El Chico, Lagunas de Chacahua, Sierra de Tamaulipas, Dzibilchantún, Barranca de Metztitlán, Cañón del Usumacinta, Calakmul, Cumbre de Monterrey) y agricultura anual (Sierra de Órganos, Playa de Escobilla, Las Huertas, Volcán Tacaná, El Potosí, Palenque, Nahá, El Pinacate y Gran Desierto de Altar, Lacan-Tun, Laguna de Chacahua), donde en 2002 no se reportan estas categorías. Otras AP con un aumento fuerte de urbanización son Cabo San Lucas, La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl, Zicuirán-Infiernillo, Cerro de la Silla y Arrecifes de Puerto Morelos.

Las AP con menos aumentos y regresiones son Valle de los Cirios, Papigochic, Meseta de Cacaxtla, Maderas del Carmen, Los Tuxtlas, Los Mármoles, Lagunas de Zempoala, Janos, General Juan Álvarez y El Vizcaíno.

9.4.2 Extensión de ecosistemas en los estados de la República Mexicana

La contabilidad de extensión de ecosistemas por estado muestra que, en Sonora, Nayarit, Chiapas, Campeche, Guerrero, Tabasco, Chihuahua, Durango, Coahuila de Zaragoza, Michoacán de Ocampo, Puebla, Quintana Roo y Zacatecas se concentra la mayor extensión de aumentos y regresiones (*Anexo 2*). Los aumentos corresponden, principalmente, a categorías de *uso del suelo*, como por ejemplo agrícola perenne, acuícola y pastizal, en Baja California (Sur), Campeche, Chiapas, Chihuahua, Coahuila de Zaragoza y estado de México. Destacan por su mayor extensión (> 1 000 km²) la agricultura anual en Jalisco, Chihuahua, Chiapas, Yucatán, Quintana Roo, Veracruz de Ignacio de la Llave, Zacatecas, Durango, Oaxaca y Tamaulipas. Además, se registran aumentos para pastizal en Sonora, Yucatán y Chiapas. Otros incrementos destacables son el bosque cultivado en Campeche, Hidalgo, San Luis Potosí, Tabasco, y Veracruz de Ignacio de la Llave; la urbanización en Colima, Chiapas, Baja California Sur, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán de Ocampo, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz de Ignacio de la Llave, Yucatán y Zacatecas; la agricultura anual en Jalisco, Michoacán de Ocampo, Nayarit, Querétaro, Quintana Roo, Sinaloa, Sonora y Yucatán; acuícola en Nayarit, Sinaloa, Sonora y Tamaulipas. Existen regresiones importantes (> 1 000 km²) para las categorías de *vegetación natural*, de los cuales destaca la selva subcaducifolia en Yucatán, Nayarit y Campeche; el pastizal en Chihuahua, Jalisco, Zacatecas, Oaxaca, Veracruz de Ignacio de la Llave y Nayarit; la selva perennifolia en Chiapas y Quintana Roo; el matorral xerófilo leñoso y la selva caducifolia en Sonora; el matorral xerófilo no leñoso en Chihuahua; el matorral xerófilo leñoso en Nuevo León y Tamaulipas; y el bosque de coníferas en Chiapas. El único uso del suelo con una regresión comparado es la agricultura anual en Guerrero. Tomando como criterio la tasa de cambio, destaca la vegetación hidrófila no leñosa en Zacatecas y el matorral xerófilo no leñoso en Guerrero (-100 % en ambos casos), el matorral xerófilo leñoso en Veracruz de Ignacio de la Llave (-16.80 %), el matorral xerófilo no leñoso en Aguascalientes (-13.24 %) y otras tierras en Michoacán de Ocampo (-6.54 %). Otros aumentos o regresiones importantes se dan en categorías más bien pequeñas, como especial otros tipos (no) leñoso, vegetación hidrófila u otras tierras, lo que levanta la pregunta sobre la confiabilidad de los cambios observados, ya que, con tipos de vegetación pequeños, los errores en los mapas pueden causar una tasa de cambio muy elevada. La regresión más grande relativa en uso del suelo fue la agricultura anual en Guanajuato y Baja California Sur (> 5 %). Las mayores regresiones para pastizal se dan en Tlaxcala, Nayarit y Ciudad de México (> 2 %). Los aumentos más grandes relativos en uso del suelo son el bosque cultivado en Tabasco; acuícola en Baja California Sur, Tamaulipas y Campeche; asentamiento en Tlaxcala; y agricultura anual en Yucatán y Quintana Roo.

Los estados que muestran cambios en extensión tanto de categorías de uso del suelo como de vegetación son Sonora, Chiapas y Chihuahua, mientras que aquellos con menos cambios son Ciudad de México, Tlaxcala y Aguascalientes (cuadro 9-6). En los estados que presentan cambios importantes, la extensión de los cambios de uso del suelo son comparables con los cambios de vegetación, sugiriendo una relación causal entre ambos tipos de cambios (cuadro 9-6).

9.4.3 Extensión de ecosistemas en las ecorregiones terrestres de México

La contabilidad de ecosistemas por ecorregión (nivel 2) revela que las mayores regresiones en términos de área absoluta se dan en la selva subcaducifolia en la planicie y lomeríos de la península de Yucatán; el pastizal en el piedemonte de la Sierra Madre Occidental; la selva perennifolia de la planicie costera y lomeríos húmedos del Golfo de México; y el matorral xerófilo no leñoso de los desiertos cálidos ($> 3\,000\text{ km}^2$). También, son importante las regresiones de la selva caducifolia de la planicie costera, lomeríos y cañones del Occidente y el matorral xerófilo leñoso de la planicie semiárida de Tamaulipas-Texas ($> 2\,000\text{ km}^2$). En cambio, los aumentos importantes corresponden a categorías de uso del suelo, siendo la agrícola anual la más dinámica, por ejemplo, para la planicie y lomeríos de la península de Yucatán, los desiertos cálidos, la planicie costera y lomeríos húmedos del Golfo de México y el piedemonte de la Sierra Madre Occidental ($> 2\,000\text{ km}^2$). En la planicie y lomeríos de la península de Yucatán también destaca el aumento de pastizal y en las depresiones intermontañas, la selva caducifolia ($> 2\,000\text{ km}^2$). Este último cambio, probablemente, se deba a un error en los insumos, ya que no es factible un aumento tan extenso como regeneración natural en 12 años en una parte del país. Tomando la tasa de cambio como criterio, destaca la pérdida total de la vegetación hidrófila leñosa en el Sistema Neovolcánico Transversal, así como del matorral xerófilo no leñoso en la planicie costera y lomeríos del Pacífico sur. La única ecorregión que registra dos ecosistemas con regresiones relativas muy importante es la Sierra de Los Tuxtlas (bosque de encino y vegetación hidrófila no leñosa). En total, son 17 ecosistemas en diferentes ecorregiones que muestran una tasa de cambio más negativa de -2% (Anexo 3). Existen 71 ecosistemas en diferentes ecorregiones con una tasa de cambio arriba de 2% , con una dominancia de categorías de uso del suelo, sobre todo de asentamientos y agrícola perenne. Otra vez, algunas clases muy pequeñas, como otras tierras, muestran tasas de cambio muy elevadas, poniendo en duda si estos cambios son derivados de inconsistencias en los insumos.

Cuadro 9-6. Las extensiones de los cambios observados entre 2002-2014 en cada estado

	Total área de cambio (km²)	Cambios uso del suelo (km²)	Cambios vegetación (km²)
Ciudad de México	181	15	-17
Tlaxcala	263	56	-59
Aguascalientes	401	112	-116
Colima	404	-36	35
Querétaro	519	123	-144
Morelos	703	-93	89
Baja California Sur	880	37	-29
Guanajuato	1 181	243	-246
Baja California	1 514	60	-4
Hidalgo	1 583	-156	165
México	1 708	208	-278
Tabasco	2 015	383	-647
San Luis Potosí	2 063	807	-809
Puebla	2 169	-295	287
Coahuila de Zaragoza	2 785	712	-739
Nuevo León	2 831	636	-721
Sinaloa	2 865	1 228	-1 182
Tamaulipas	3 326	1 286	-1 478
Michoacán de Ocampo	3 403	328	-274
Campeche	3 599	1 226	-1 221
Durango	3 679	1 249	-1 240
Zacatecas	3 799	1 287	-1 276
Veracruz de Ignacio de la Llave	4 136	1 787	-1 778
Quintana Roo	4 143	1 761	-1 764
Nayarit	5 127	748	-713
Guerrero	5 238	-1 043	1 040
Oaxaca	5 474	1 606	-1 630
Yucatán	7 246	2 158	-2 163
Jalisco	8 193	3 997	-4 143
Chihuahua	8 818	3 761	-3 800
Chiapas	9 098	3 185	-3 230
Sonora	9 552	1 506	-1 546

9.5 Cuadros detallados

9.5.1 Servicios de los ecosistemas y sus beneficios en las actividades económicas y humanas

Continúa

Servicio del ecosistema		Descripción
Servicios de provisión		
Servicios de provisión de biomasa	Servicios de provisión a cultivos*	Corresponde a la contribución de los ecosistemas al crecimiento de las plantas cultivadas que son cosechadas por unidades económicas para varios usos. Es un servicio final de los ecosistemas.
	Servicio de provisión de biomasa de pasturas*	Corresponde a la contribución de los ecosistemas al crecimiento de la biomasa de pasturas que es un insumo al crecimiento del ganado. Este servicio excluye la contribución al crecimiento de los cultivos para producir forraje para ganado. Esta contribución está incluida dentro de los servicios de provisión. Es un servicio final del ecosistema, pero puede ser un servicio intermedio para la provisión al ganado.
	Servicios de provisión de ganado*	Corresponde a la contribución de los ecosistemas al crecimiento del ganado y de sus productos derivados (por ejemplo, carne, leche, huevos, lana y cuero) que son usadas por unidades económicas para varios usos, pero principalmente para la producción de alimentos. Este es un servicio final. No se hace distinción entre los servicios al ganado en caso de que las pasturas se contabilicen como un servicio final del ecosistema.
	Servicios de provisiones de acuicultura	Corresponde a la contribución de los ecosistemas al crecimiento de animales y plantas (por ejemplo, peces) en lugares de acuicultura que son cultivados por unidades económicas para varios usos. Es un servicio final del ecosistema.
	Servicios de provisiones de madera	Corresponde a la contribución de los ecosistemas al crecimiento de árboles y biomasa leñosa en áreas cultivadas (plantaciones) o en producción no cultivada que son cultivadas por unidades económicas para varios usos incluyendo producciones madereras y energía. Este servicio excluye contribuciones de productos que no corresponden al bosque. Es un servicio final del ecosistema.

Continúa

Servicio del ecosistema		Descripción
Servicios de provisión		
	Servicios de provisión de peces salvajes y otros servicios de biomasa acuática natural	Los servicios de provisión de peces salvajes y otros servicios de biomasa acuática natural contribuyen al crecimiento de los peces y otra biomasa acuática que es capturada en contextos de producción no cultivada por unidades económicas para varios usos, principalmente para la producción de alimentos. Es un servicio final del ecosistema.
	Servicios de provisión de animales salvajes, plantas y otra biomasa	Corresponde a la contribución de los ecosistemas al crecimiento de animales y plantas silvestres y otra biomasa que son capturados y recolectados en contextos de producción no cultivados por unidades económicas para diversos usos. El ámbito de aplicación incluye los productos forestales no madereros (PFNM) [1] y los servicios relacionados con las actividades de caza, captura y bioprospección, pero excluye los peces silvestres y otra biomasa acuática natural (incluidos en la clase anterior). Es un servicio final del ecosistema.
Servicios de material genético		Los servicios de material genético son las contribuciones al ecosistema de toda la biota (incluyendo la producción de semillas, esporas o gametos) que son utilizadas por las unidades económicas, por ejemplo: (i) para desarrollar nuevas razas de animales y plantas, (ii) en la síntesis de genes o (iii) en el desarrollo de productos que utilizan directamente material genético. Esto se suele registrar como un servicio intermedio al suministro de biomasa.
Suministro de agua		Los servicios de suministro de agua reflejan las contribuciones combinadas de los ecosistemas a la regulación del flujo de agua, la purificación del agua y otros servicios de los ecosistemas para el suministro de agua de calidad adecuada a los usuarios para diversos usos, incluido el consumo doméstico. Es un servicio final del ecosistema.
Otros servicios de aprovisionamiento		Otros servicios de aprovisionamiento.
Servicios de regulación y mantenimiento		
Servicios de regulación global del clima		Los servicios de regulación del clima global son las contribuciones de los ecosistemas a la regulación de la composición química de la atmósfera y los océanos que afectan al clima global a través de la acumulación y retención de carbono y otros GEI (por ejemplo, el metano) en los ecosistemas y la capacidad de los ecosistemas para eliminar el carbono de la atmósfera. Es un servicio final del ecosistema.
Servicios de regulación del régimen de lluvias (a escala subcontinental)		Los servicios de regulación del régimen de lluvias son las contribuciones de los ecosistemas a la vegetación, en particular de los bosques, al mantenimiento del régimen de lluvias mediante la evapotranspiración a escala subcontinental. Los bosques y el resto de la vegetación reciclan la humedad hacia la atmósfera, donde está disponible para la generación de precipitaciones. Las precipitaciones en el interior de los continentes dependen totalmente de este reciclaje. Puede tratarse de un servicio final o intermedio.

Continúa

Servicio del ecosistema		Descripción
Servicios de provisión		
Servicios locales (micro y meso) de regulación del clima		Los servicios locales de regulación del clima son las contribuciones de los ecosistemas a la regulación de las condiciones atmosféricas ambientales (incluidos los climas de micro y mesoescala) mediante la presencia de vegetación que mejora las condiciones de vida de las personas y apoya la producción económica. Algunos ejemplos son la refrigeración por evaporación que proporcionan los árboles urbanos (<i>espacio verde</i>), el papel de las masas de agua urbanas (<i>espacio azul</i>) y la contribución de los árboles a la hora de proporcionar sombra a los seres humanos y al ganado. Puede tratarse de un servicio final o intermedio.
Servicios de filtración de aire		Los servicios de filtración del aire son las contribuciones de los ecosistemas al filtrado de los contaminantes transportados por el aire a través de la deposición, la absorción, la fijación y el almacenamiento de los contaminantes por parte de los componentes del ecosistema, especialmente las plantas, que mitigan los efectos nocivos de los contaminantes. Se trata, por lo general, de un servicio final del ecosistema.
Servicios de regulación de la calidad del suelo		Los servicios de regulación de la calidad del suelo son las contribuciones de los ecosistemas a la descomposición de materiales orgánicos e inorgánicos y a la fertilidad y las características de los suelos, por ejemplo, para el aporte a la producción de biomasa. Esto se suele registrar como un servicio intermedio.
Servicios de retención de suelos y sedimentos	Servicios de control de la erosión del suelo	Los servicios de control de la erosión del suelo son las contribuciones de los ecosistemas, en particular los efectos estabilizadores de la vegetación, que reducen la pérdida de suelo (y sedimentos) y apoyan el uso del medio ambiente (por ejemplo, la actividad agrícola, el suministro de agua). Esto puede registrarse como un servicio final o intermedio.
	Servicios de mitigación de desprendimientos	Los servicios de mitigación de los desprendimientos de tierra son las contribuciones de los ecosistemas, en especial los efectos estabilizadores de la vegetación, que mitigan o evitan los posibles daños a la salud y la seguridad de las personas y los efectos perjudiciales para los edificios y las infraestructuras que surgen del movimiento masivo (desgaste) del suelo y las rocas. Es un servicio final del ecosistema.
Servicios de remediación de residuos sólidos		Los servicios de remediación de residuos sólidos son las contribuciones del ecosistema a la transformación de sustancias orgánicas o inorgánicas, mediante la acción de microorganismos, algas, plantas y animales que mitigan sus efectos nocivos. Se puede registrar como un servicio final o intermedio del ecosistema.
Servicios de purificación del agua (regulación de la calidad del agua)	Retención y descomposición de nutrientes	Los servicios de purificación del agua son las contribuciones de los ecosistemas a la restauración y el mantenimiento del estado químico de las masas de agua superficiales y subterráneas a través de la descomposición o la eliminación de nutrientes y otros contaminantes por parte de los componentes del ecosistema que mitigan los efectos nocivos de los contaminantes en el uso o la salud humanos. Esto puede registrarse como un servicio final o intermedio.
	Retención y descomposición de otros contaminantes	

Continúa

Servicio del ecosistema		Descripción
Servicios de provisión		
Servicios de regulación del caudal de agua	Servicios de mantenimiento del flujo de base	Los servicios de regulación del agua son las contribuciones de los ecosistemas a la regulación de los caudales de los ríos y de las capas freáticas y lacustres. Se derivan de la capacidad de los ecosistemas para absorber y almacenar agua, y liberar gradualmente el agua durante las estaciones o periodos secos a través de la evapotranspiración y, por lo tanto, asegurar un flujo regular de agua. Esto puede registrarse como un servicio final o intermedio del ecosistema.
	Servicios de mitigación del flujo máximo	Los servicios de regulación del agua son las contribuciones de los ecosistemas a la regulación de los caudales de los ríos y de las capas freáticas y lacustres. Se derivan de la capacidad de los ecosistemas para absorber y almacenar agua y, por lo tanto, mitigar los efectos de las inundaciones y otros fenómenos extremos relacionados con el agua. Los servicios de mitigación de los caudales máximos se suministrarán junto con los servicios de mitigación de las inundaciones fluviales al proporcionar el beneficio de la protección contra las inundaciones. Es un servicio final del ecosistema.
Servicios de control de inundaciones	Servicios de protección del litoral	Los servicios de protección del litoral son las contribuciones de los ecosistemas a los elementos lineales del paisaje marino, por ejemplo, los arrecifes de coral, los bancos de arena, las dunas o los ecosistemas de manglares a lo largo de la costa, en la protección de la costa y, por lo tanto, en la mitigación de los impactos de las mareas o las tormentas en las comunidades locales. Es un servicio final del ecosistema.
	Servicios de mitigación de inundaciones fluviales	Los servicios de mitigación de las inundaciones fluviales son las contribuciones del ecosistema de la vegetación ribereña que proporciona una estructura y una barrera física a los niveles altos de agua y, por lo tanto, mitiga los impactos de las inundaciones en las comunidades locales. Los servicios de mitigación de las inundaciones fluviales se suministrarán junto con los servicios de mitigación de los caudales máximos para proporcionar el beneficio de la protección contra las inundaciones. Es un servicio final del ecosistema.
Servicios de mitigación de tormentas		Los servicios de mitigación de tormentas son las contribuciones del ecosistema de la vegetación, incluidos los elementos lineales, en la mitigación de los impactos del viento, la arena y otras tormentas (que no sean eventos relacionados con el agua) en las comunidades locales. Es un servicio final del ecosistema.
Servicios de atenuación del ruido		Los servicios de atenuación del ruido son las contribuciones de los ecosistemas a la reducción del impacto del ruido sobre las personas que mitigan sus efectos nocivos o estresantes. Se trata, por lo general, de un servicio final del ecosistema.
Servicios de polinización		Los servicios de polinización son las contribuciones de los ecosistemas por parte de los polinizadores silvestres a la fertilización de los cultivos que mantiene o aumenta la abundancia y/o diversidad de otras especies que las unidades económicas utilizan o disfrutan. Esto puede registrarse como un servicio final o intermedio.

Continúa

Servicio del ecosistema		Descripción
Servicios de provisión		
Servicios de control biológico	Servicios de control de plagas	Los servicios de control biológico son las contribuciones de los ecosistemas a la reducción de la incidencia de las especies que pueden prevenir o reducir los efectos de las plagas en los procesos de producción de biomasa u otras actividades económicas y humanas. Esto puede registrarse como un servicio final o intermedio.
	Servicios de control de enfermedades	Los servicios de control de enfermedades son las contribuciones del ecosistema a la reducción de la incidencia de las especies que pueden prevenir o reducir los efectos de las especies en la salud humana. Se trata, por lo general, de un servicio final del ecosistema.
Servicios de mantenimiento de la población y el hábitat de los viveros		Los servicios de mantenimiento de poblaciones y hábitats son las contribuciones de los ecosistemas necesarias para mantener las poblaciones de especies que las unidades económicas utilizan o disfrutan en última instancia, ya sea mediante el mantenimiento de los hábitats (por ejemplo, para los viveros o la migración) o la protección de las reservas genéticas naturales. Este servicio es un servicio intermedio y puede contribuir a una serie de servicios ecosistémicos finales diferentes, como el suministro de biomasa y los servicios relacionados con el ocio.
Otros servicios de regulación y mantenimiento		
Servicios culturales		
Servicios relacionados con el ocio		Los servicios relacionados con la recreación son las contribuciones de los ecosistemas, en particular a través de las características y cualidades biofísicas de los ecosistemas, que permiten a las personas utilizar y disfrutar del medio ambiente a través de interacciones directas, <i>in situ</i> , físicas y experienciales con el medio ambiente. Esto incluye los servicios prestados tanto a la población local como a la no local (es decir, a los visitantes, incluidos los turistas). Los servicios relacionados con la recreación también pueden suministrarse a quienes practican la pesca y la caza recreativas. Es un servicio final del ecosistema.
Servicios de amenidad visual*		Los servicios de amenidad visual son las contribuciones de los ecosistemas a las condiciones de vida locales, en particular a través de las características y cualidades biofísicas de los ecosistemas que proporcionan beneficios sensoriales, especialmente visuales. Este servicio se combina con otros servicios de los ecosistemas, incluidos los servicios relacionados con el ocio y los servicios de atenuación del ruido, para sustentar los valores de amenidad. Es un servicio final del ecosistema.
Servicios educativos, científicos y de investigación		Los servicios educativos, científicos y de investigación son las contribuciones de los ecosistemas, especialmente a través de las características y cualidades biofísicas de los ecosistemas, que permiten a las personas utilizar el medio ambiente mediante interacciones intelectuales con el mismo. Es un servicio final del ecosistema.

Concluye

Servicio del ecosistema		Descripción
Servicios de provisión		
Servicios espirituales, artísticos y simbólicos		Los servicios artísticos espirituales y simbólicos son las contribuciones de los ecosistemas, especialmente a través de las características y cualidades biofísicas de los ecosistemas, que son reconocidas por las personas por su significado cultural, histórico, estético, sagrado o religioso. Estos servicios pueden afirmar la identidad cultural de la gente y pueden inspirar a las personas a expresarse a través de diversos medios artísticos. Se trata de un último servicio de los ecosistemas.
Otros servicios culturales		
Flujos relacionados con los valores de no uso		
Apreciación de los ecosistemas y las especies		La apreciación de los ecosistemas y las especies se refiere al bienestar que las personas obtienen de la existencia y la preservación del medio ambiente para las generaciones actuales y futuras, independientemente de cualquier uso directo o indirecto.

Fuente: tabla 6.3, UN (2021), p. 126.

9.6 Glosario

Biodiversidad: variabilidad entre organismos vivos de todas las fuentes, incluidos —entre otros— los terrestres, marinos y otros ecosistemas acuáticos, y los complejos ecológicos de los cuales forman parte; esto incluye la diversidad dentro de cada especie, entre especies y de los ecosistemas.

Acuícola: se refiere al manejo de especies dulceacuícolas o marinas con fines de obtención de producción de carne o de crías (piscifactorías, granjas de cultivos de camarón, granjas de cultivos de peces, etcétera).

Agua: corresponde a los cuerpos de agua epicontinentales (interiores o de agua dulce).

Agrícola anual: son las áreas de producción de cultivos, cuyo periodo vegetativo es menor a 12 meses y requieren de una nueva siembra para la obtención de la cosecha; estos se concentran de dos periodos productivos, primavera/verano y otoño/invierno.

Agrícola perenne: es aquel sistema manejado por el hombre cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, teniendo varios ciclos de producción (cosechas) a lo largo de su vida.

Asentamientos: corresponde a cualquier superficie predominantemente artificial que incluye estructuras urbanas, parques urbanos y zonas industriales.

Bosque cultivado: es aquel sistema que se establece mediante la plantación y manejo de diferentes especies arboladas con un fin productivo, sobre todo en aquellas áreas que presentan una perturbación debido a las actividades humanas.

Bosque de coníferas: formaciones vegetales de zonas templadas, húmedas y subhúmedas constituidas por gimnospermas de hojas perennes; en México se les encuentra prácticamente desde el nivel del mar hasta el límite de la vegetación arbórea.

Bosque de encino: comunidades vegetales integradas por múltiples especies del género *Quercus* (encinos, robles) que, en México, salvo condiciones muy áridas, se ubican prácticamente desde los 300 hasta los 2 800 m; se encuentra muy relacionado con los bosques de pino, formando una serie de bosques mixtos con especies de ambos géneros.

Bosque mesófilo de montaña: este ecosistema vegetal se caracteriza por la presencia de vegetación arbórea densa, con epífitas y helechos; se localiza principalmente en montañas, barrancas y sitios que presentan condiciones favorables de humedad y neblinas frecuentes; en México se localiza a altitudes entre los 600 y 2 800 m; es también conocido como el bosque de niebla.

Desarrollo de la vegetación: este concepto se refiere a los distintos estados sucesionales de la vegetación natural y considera la vegetación primaria (es aquella en la que la vegetación no presenta alteración) y secundaria (cuando un tipo de vegetación primaria es eliminada o alterada por diversos factores humanos o naturales, surge una comunidad vegetal significativamente diferente a la original con estructura y composición florística heterogénea) (INEGI, 2017c).

Ecosistema: complejo dinámico de comunidades vegetales, animales o de microorganismos y su medio ambiente —no vivo— interactuando como una unidad funcional (CDB, 1993).

Especial otros tipos leñoso: bajo esta categoría se encuentra la vegetación del bosque de mezquite y el palmar; el mezquite se desarrolla en el fondo de valles y depresiones en las planicies, donde el manto freático se mantiene a poca profundidad; es también común a lo largo de los arroyos y ríos intermitentes en las regiones semiáridas, como en la Llanura de Río Verde, San Luis Potosí, y en el Valle de Aguascalientes, Aguascalientes, o partes del Bajío, Guanajuato; los palmares se desarrollan en climas cálidos húmedos y subhúmedos principalmente, pero también en climas secos, pero con humedad en el suelo.

Matorral xerófilo leñoso: este ecosistema vegetal es propio de las zonas áridas y semiáridas de México y está constituido básicamente por comunidades arbustivas micrófilas y espinosas.

Matorral xerófilo no leñoso: este ecosistema vegetal es propio de las zonas áridas de México y está constituido básicamente por comunidades herbáceas (sin tallo), micrófilas (hoja pe-

queña) y espinosas; un ejemplo de esta vegetación lo constituyen las especies de los géneros *Yucca* y *Opuntia*.

Otros tipos de vegetación: comunidades vegetales diferentes en su caracterización ecológica a las formaciones citadas anteriormente (vegetación de dunas costeras, por ejemplo).

Pastizal: este ecosistema está constituido por comunidades herbáceas en las que predominan las especies de gramíneas o graminoides; estas comunidades están determinadas por condiciones naturales de clima y suelo; en algunos casos son de origen natural, pero en otros obedece a condiciones de perturbación por sobrepastoreo.

Selva caducifolia: se caracteriza por formaciones vegetales de origen tropical que crecen en lugares con precipitación estacional y donde más de 75 % de sus componentes vegetales pierden las hojas durante la época seca del año.

Selva perennifolia: agrupa formaciones vegetales tropicales que se caracterizan porque más de 75 % de sus elementos conservan las hojas durante la mayor parte del año.

Selva subcaducifolia: se caracteriza por formaciones vegetales de origen tropical que crecen en lugares con precipitación estacional y cuyos componentes vegetales pierden las hojas de 50 a 75 % durante la época seca del año.

Vegetación hidrófila leñosa: este ecosistema está constituido por comunidades vegetales que habitan en terrenos pantanosos o inundables de aguas salobres o dulces poco profundas.

Vegetación hidrófila no leñosa: vegetación herbácea (sin troncos), propia de lugares pantanosos o de agua dulce; incluye las categorías INEGI de popal, vegetación halófila hidrófila, vegetación secundaria arbustiva de vegetación halófila hidrófila, tular.

Vegetación inducida: se considera en esta agrupación a las comunidades vegetales que son favorecidas al interrumpirse el proceso natural de sucesión vegetal debido principalmente a las actividades humanas o bien a circunstancias especiales que favorecen su aparición (este no es un ecosistema natural).

Vegetación primaria: es aquella que no presenta alteración.

Vegetación secundaria: cuando un tipo de vegetación primaria es eliminada o alterada por diversos factores humanos o naturales, surge una comunidad vegetal significativamente diferente a la original, con estructura y composición florística heterogénea (INEGI, 2017c); estas comunidades originadas por la destrucción de la vegetación primaria pueden encontrarse en recuperación tendiendo al estado original y en otros casos presenta un aspecto y composición florística diferente; se desarrollan en zonas desmontadas para diferentes usos y en áreas agrícolas abandonadas; en la clasificación de estas comunidades se consideran las etapas sucesionales secundarias: arbórea, arbustiva y herbácea.

CUENTAS DE LOS ECOSISTEMAS DE MÉXICO



Resultados del Proyecto
**Natural Capital Accounting and
Valuation of Ecosystem Services**
(NCAVES)

Conociendo México

01 800 111 46 34
www.inegi.org.mx
atencion.usuarios@inegi.org.mx

    **INEGI** Informa



**MEDIO
AMBIENTE**
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



System of
Environmental
Economic
Accounting



**United
Nations**

UN 
**environment
programme**



Funded by the European Union