

Capítulo 1

Análisis del uso y cobertura de suelo en México para una gestión territorial sustentable

*Gabriela Suárez González
María Isabel Hernández Sánchez
Elda Magdalena López Castro*

<https://doi.org/10.61728/AE20250614>



1. Introducción

Los suelos desempeñan un papel fundamental para la vida debido a que proporcionan una amplia gama de servicios ecosistémicos y son el sustento de las actividades socioeconómicas. Estos servicios incluyen la producción de biomasa en ecosistemas terrestres, crucial para la obtención de alimentos, forraje, fibra y energía de base biológica. Los suelos regulan los flujos de gases climáticos como dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4). También desempeñan un papel vital en la limpieza, almacenamiento y suministro de agua, además de servir como cimientos para edificaciones y suministro de materiales de construcción. Adicional a estas funciones prácticas, los suelos proporcionan entornos estéticos, cubiertos de vegetación¹, que brindan hábitats para las diversas formas de vida, así como espacios para la recreación e inspiración humana (Löbmann et al., 2022).

Los cambios espaciotemporales en la vegetación no solo conllevan modificaciones en los parámetros de la superficie, sino que también ejercen un impacto significativo en los ecosistemas, interactuando de manera profunda con las poblaciones humanas (Lin et al., 2022). La desertificación, por su parte, representa un proceso de degradación del suelo y la vegetación, siendo su origen usualmente atribuido a una combinación de diversos factores, entre los que se incluyen las variaciones climáticas y las actividades humanas (Karnieli et al., 2014).

El informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2019) destaca que la adopción de una gestión sustentable del suelo puede desempeñar un papel crucial en la disminución de los efectos adversos causados por diversos factores de estrés, incluyendo el cambio climático, sobre los ecosistemas y las comunidades humanas, por lo que el objetivo de esta investigación es analizar los cambios en el uso y cobertura

¹ La vegetación se refiere a la comunidad de plantas que cubre la superficie de un área determinada (Lin et al., 2022).

de suelo en México y su relación con las presiones humanas, el estado del ambiente y las respuestas políticas o acciones implementadas entre 2010 y 2018.

Los estudios que abordan como tópico principal los cambios en el uso y cobertura del suelo son numerosos y emplean metodologías diversas. Por ejemplo, Pérez-Vega et al. (2020) analizaron los cambios de uso y cobertura del suelo en el estado de Guanajuato, México, en tres periodos distintos entre 2002 y 2014 a través del estudio de cartografía, e identificaron procesos de transformación y degradación ambiental mediante la evaluación de tasas de cambio, intensidad del cambio y secuencias temporales de las coberturas del suelo.

Vázquez-Valencia y García-Almada (2018) llevaron a cabo un análisis del desarrollo sustentable en un municipio del estado de Jalisco, México, utilizando indicadores de Presión-Estado-Respuesta (PER) y Fuerzas conductoras-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (FPEIR). Identificaron el manejo inadecuado de los residuos, que representa una presión significativa en términos de degradación de los ecosistemas y pérdida de biodiversidad. Además, observaron una alta vulnerabilidad ante el cambio climático y contaminación del aire. Asimismo, los investigadores encontraron evidencia de una aplicación deficiente de las leyes existentes relacionadas con la gestión ambiental en el municipio, lo que indicó una falta de compromiso por parte de las autoridades locales en la protección y respeto del medio ambiente.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) propuso el modelo PER para abordar de manera sistemática la identificación de indicadores, y se ha consolidado como un modelo ampliamente aceptado para evaluar la sustentabilidad, además de ser uno de los más utilizados (Woodhouse et al., 2000). La presión se refiere a las actividades humanas que impactan el medio ambiente, provocando alteraciones en la calidad y cantidad de los recursos naturales. Las presiones conducen a un estado específico del ambiente físico, químico y biológico, así como a la condición de los ecosistemas y sus funciones ecológicas. Este estado incluye a la población humana, que responde a estos cambios a través de modificaciones en aspectos ambientales, económicos y políticas sectoriales. Estos elementos forman un circuito de

retroalimentación en relación con las presiones ejercidas, creando una interacción compleja y dinámica. Cabe destacar que estas presiones se consideran mayormente negativas, ya que pueden tener efectos adversos sobre el medio ambiente y la calidad de vida de las comunidades (Quiroga, 2007; Woodhouse et al., 2000).

En estudios realizados a nivel internacional, Grecchi et al. (2014) evaluaron los cambios históricos en el uso y la cobertura del suelo y sus impactos en el medio ambiente en una región de Brasil de 1985 a 2005. Emplearon un enfoque multidisciplinario que constó de tres etapas: en primer lugar, cuantificaron los cambios en el uso y cobertura del suelo utilizando datos recopilados por sensores remotos; luego, evaluaron los efectos de estos cambios en tierras vulnerables, como aquellas propensas a la erosión y los humedales; finalmente, resumieron la información anterior mediante indicadores ambientales clave, que fueron evaluados a través del modelo PER. Los resultados revelaron una transformación drástica del paisaje en la región seleccionada, que pasó de ser un área con vegetación natural a una región agrícola consolidada.

Gu et al. (2022) evaluaron la seguridad del sistema agua-energía-alimentos (WEF, por sus siglas en inglés) en las nueve provincias de la cuenca del río Amarillo, China, durante 2006-2019. Para ello, utilizaron un modelo PER con el fin de identificar los factores clave que influyen en el desarrollo del sistema WEF, su estado actual y la respuesta social. Los resultados obtenidos mostraron que la presión sobre el sistema se ha reducido en las provincias de Gansu, Ningxia y Shanxi debido a la disminución de las emisiones de aguas residuales por persona y el consumo de energía por unidad de Producto Interno Bruto (PIB). Asimismo, observaron una mejora progresiva en el estado del sistema en varias provincias a lo largo de los años. Sin embargo, la respuesta del sistema ha experimentado un aumento en todas las provincias, con la excepción de Shanxi. Los investigadores descubrieron que existen diferencias espaciales y temporales significativas entre las distintas provincias, aunque las disparidades regionales se están reduciendo con el tiempo.

Jatav y Naik (2023) realizaron un estudio para evaluar la sustentabilidad agrícola en 14 regiones agroclimáticas principales de la India, utilizando el modelo PER y un enfoque basado en indicadores. Para ello,

desarrollaron cuatro índices clave: el índice de sustentabilidad ambiental, el índice de seguridad económica, el índice de seguridad social y, finalmente, el índice de sustentabilidad agrícola que integra los tres componentes anteriores. Los resultados obtenidos revelaron que la Región de la Llanura Transgengática se posicionó en el primer lugar en términos de sustentabilidad agrícola, mientras que la Región del Himalaya Oriental ocupó la última posición.

Las investigaciones revisadas han demostrado que los cambios en el uso y cobertura del suelo tienen un impacto significativo en los ecosistemas y en las poblaciones humanas, lo que destaca la importancia de adoptar una gestión sustentable del suelo para mitigar los efectos adversos, especialmente frente al cambio climático. Estudios como los revisados anteriormente nos brindan valiosa información sobre la importancia de considerar indicadores y modelos como el PER para comprender y abordar estos desafíos. El cuidado y protección de la cobertura de suelos son fundamentales para asegurar un futuro más resiliente y equitativo para las generaciones futuras y preservar la salud de nuestro planeta.

2. Metodología

Se eligió a México por su extensión territorial, que ocupa el lugar 6 en el continente americano y el lugar 14 a nivel mundial, con 1 960 189 kilómetros cuadrados (km²). Posee 32 entidades federativas. El territorio de México se encuentra dividido por una línea imaginaria denominada trópico de Cáncer. Esta división tiene una notable influencia en la variación climática del país: al norte de esta línea, se experimenta un clima frío y templado, mientras que al sur se caracteriza por un clima cálido. Esta división también contribuye a la amplia diversidad de suelos y vegetación presentes en el territorio mexicano (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2023).

Se seleccionó el modelo Presión-Estado-Respuesta, por ser uno de los más empleados en la literatura, es flexible y se ajusta a distintos problemas y escalas, utiliza indicadores que permiten entender realidades complejas y evidencia cambios espacio-temporales (Travieso-Bello, 2012). Mediante una revisión de la literatura, se identificaron los com-

ponentes e indicadores a emplear, de presión, estado y respuesta para el modelo PER (tabla 1) derivados de la revisión de la literatura.

Tabla 1

Componentes e indicadores del modelo PER para uso y cobertura del suelo

	Componente	Autor	Indicador	Fuente de información
Presión	Crecimiento económico	Nadal & Aguayo (2020)	Tasa de crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB).	INEGI
	Crecimiento demográfico	Nadal & Aguayo (2020)	Tasa de crecimiento de la población.	INEGI
	Urbanización	Nadal & Aguayo (2020)	Tasa de variación de la superficie urbana y edificada.	National Aeronautics and Space Administration (NASA*)
	Extracción y uso de recursos	Nadal & Aguayo (2020)	Tasa de crecimiento de la producción forestal maderable.	INEGI
			Tasa de crecimiento de la producción agrícola	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)
	Fenómenos extremos	IPCC (2019)	Promedio anual de desastres por fenómenos hidrometeorológicos. Promedio anual de emergencias por fenómenos hidrometeorológicos.	Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) CENAPRED

	Componente	Autor	Indicador	Fuente de información
Estado	Superficie (Deforestación)	Vázquez-Valencia & García-Almada (2018)	Tasa de variación de la superficie de bosques.	NASA*
			Tasa de variación de la superficie de humedales permanentes.	NASA*
			Tasa de variación de la superficie de sabanas.	NASA*
			Tasa de variación de la superficie de matorrales.	NASA*
			Tasa de variación de la superficie de pastizales.	NASA*
			Tasa de variación de la superficie de tierras de cultivo.	NASA*
			Tasa de variación de la superficie estéril o con poca vegetación.	NASA*
	Temperatura	IPCC (2019)	Tasa de variación de temperatura.	INEGI
	Precipitación	IPCC (2019)	Tasa de variación de precipitación.	INEGI

	Componente	Autor	Indicador	Fuente de información
Respuesta	Instrumentos de cambio climático	-	Tasa de existencia de instrumentos de cambio climático.	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)
	Instrumentos de emisiones y calidad del aire	-	Tasa de existencia de instrumentos de emisiones y calidad del aire.	INECC
	Instrumentos de manejo de residuos sólidos	-	Tasa de existencia de instrumentos de manejo de residuos sólidos.	INECC
	Instrumentos de gestión territorial	-	Tasa de existencia de instrumentos de gestión territorial.	INECC

* Datos geoespaciales del instrumento MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra + Aqua Land Cover.

Fuente: elaboración propia.

La tasa de variación de la superficie de bosques incluye la superficie de bosques mixtos, caducifolios y siempreverdes. Respecto al componente de los fenómenos extremos, se consideran las definiciones de “desastre” y “emergencia” de la Ley General de Protección Civil (LGPC, 2012). Los instrumentos de política climática existentes en México atienden a los componentes de cambio climático, emisiones y calidad del aire, manejos de residuos sólidos, con los que todas las entidades federativas deberían contar, en total diecisiete, los cuales se desglosan en la Tabla 2.

Tabla 2*Instrumentos de política climática en México*

Instrumento de política climática	Nombre del instrumento	Acrónimo
Cambio climático	Ley de Cambio Climático	LCC
	Reglamento de Cambio Climático	RCC
	Plan estatal de Desarrollo	PED
	Programa Estatal en materia de Cambio Climático	PCC
	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático	CICC
	Fondo Estatal de Cambio Climático	FCC
	Evaluación de la Política Estatal de Cambio Climático	EPCC
Emisiones y calidad del aire	Programa de Gestión Integral de la Calidad del Aire	PGICC
	Inventario Estatal de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero	IGEI
Manejo de residuos sólidos	Ley Estatal de Manejo Integral de Residuos	LMIR
	Reglamento de la Ley Estatal de Manejo de Residuos	RLMIR
	Programa Estatal para la Gestión, Manejo y/o Disposición Final de los Residuos	PMIR
Gestión territorial	Programa Estatal de Ordenamiento Ecológico Territorial	POET
	Atlas Estatal de Riesgo	AR
	Planes o Programas de Desarrollo Urbano	PDU
	Reglamento de Construcción	RC
	Plan o Programa Estatal de Movilidad	PM

Fuente: elaboración propia a partir del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2023).

Se estimaron las tasas de crecimiento del PIB, población, producción forestal maderable, producción forestal agrícola, superficies de los distintos tipos de cobertura del suelo, temperatura y precipitación mediante la ecuación 1, también conocida como tasa de variación porcentual (Sánchez, 2014), para posteriormente realizar el análisis de los indicadores.

$$\Delta Y_{t-1}^t = \left(\frac{Y_t - Y_{t-1}}{Y_{t-1}} \right) (100) \text{ (ecuación 1)}$$

Donde:

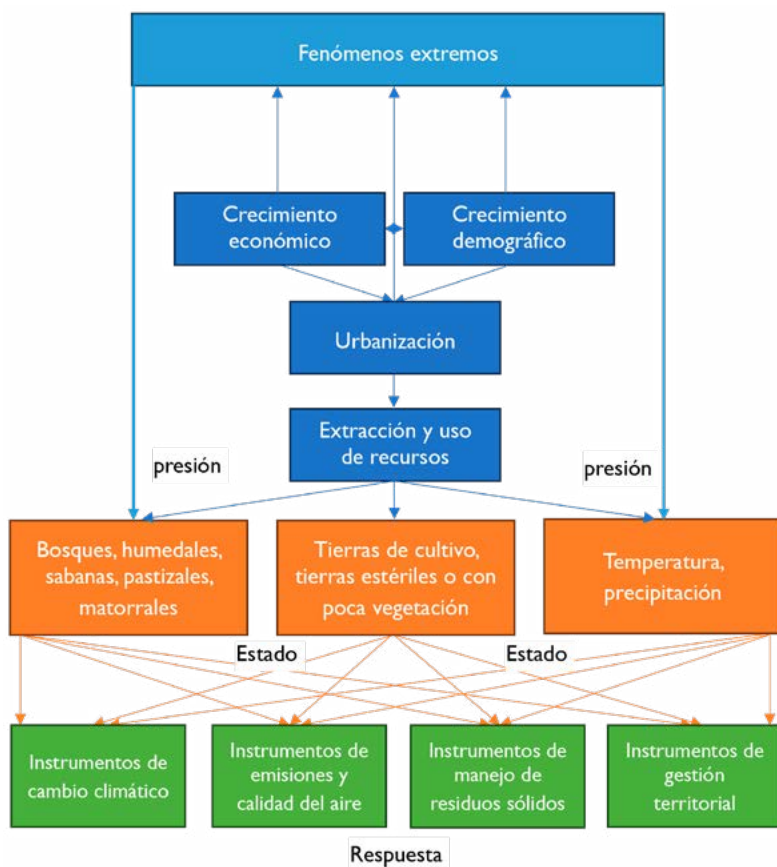
Y = variable de interés.

t = año reciente (2018).

t-1= año anterior (2010).

3. Resultados y discusión

Derivado del análisis, se obtuvo que el crecimiento económico, junto con el crecimiento demográfico, incide en la urbanización, lo que conlleva una mayor extracción de recursos. Todo lo anterior contribuye al cambio climático, donde los fenómenos extremos son uno de sus efectos. Todos estos factores generan presión sobre la cobertura del suelo. Su estado se evidencia a través de los distintos ecosistemas como bosques, humedales, matorrales, pastizales y sabanas, así como las tierras de cultivo y las estériles o con poca vegetación. La respuesta ha sido a través de política climática, integrada por cuatro tipos de instrumentos: cambio climático, emisiones y calidad del aire, manejo de residuos sólidos y gestión territorial (Figura 1).

Figura 1*Modelo PER de cambio y uso del suelo**Fuente:* elaboración propia.

3.1 Indicadores de Presión

Respecto al análisis de los indicadores de presión, la tasa de crecimiento del PIB es un indicador clave que refleja la evolución de la economía de una región. En este caso, se observó que Baja California Sur, San Luis Potosí y la Ciudad de México tuvieron las tasas de crecimiento del PIB más altas, lo que sugiere un mayor desarrollo económico en estas entidades federativas. Por otro lado, Chiapas, Tabasco, Campeche y Tlaxcala

presentaron tasas negativas, lo que indicó un posible estancamiento o retroceso económico en esas regiones. Estos datos podrían influir en el uso y cobertura del suelo, ya que un mayor crecimiento económico podría estar relacionado con una mayor urbanización y cambios en la estructura productiva.

El crecimiento de la población es un factor importante debido a que una mayor población demanda más recursos y espacio habitable. Quintana Roo, Baja California Sur y Querétaro presentaron tasas de crecimiento poblacional más altas, lo que sugiere un aumento significativo de la población en esas regiones. Esto implicó una mayor presión sobre el suelo para la construcción de viviendas, infraestructuras y servicios. Por otro lado, Ciudad de México, México y Tamaulipas mostraron tasas de crecimiento poblacional relativamente bajas, lo que podría influir en un menor impacto en la demanda de uso del suelo. Al respecto, Nadal y Aguayo (2020) señalan que la presión más fuerte sobre el medio ambiente y los recursos naturales no proviene de las regiones que en la actualidad experimentan tasas de crecimiento demográfico superiores al promedio y que están marcadas por mayores niveles de pobreza, sino que dicha presión se encuentra más vinculada al desarrollo de mercados para la población de mayores ingresos en regiones desarrolladas y los segmentos de altos ingresos en las poblaciones de las regiones en vías de desarrollo. La presión proviene de regiones con población que ostenta un mayor poder de compra, dando como resultado mayores tasas de consumo y desperdicio.

La tasa de crecimiento de la superficie urbana y edificada está directamente relacionada con la expansión de áreas urbanizadas y la construcción de infraestructuras. Oaxaca, Nayarit y Coahuila lideraron en tasas de crecimiento de superficie urbana y edificada más altas. Estas tasas altas pueden implicar una mayor conversión de áreas naturales y agrícolas en zonas urbanas, lo que podría afectar la calidad y disponibilidad del suelo para otros usos. En contraste, Ciudad de México tiene una tasa de crecimiento muy baja, lo que podría deberse a la falta de espacios disponibles para la expansión urbana. Sin embargo, también hay que considerar la proporción de la superficie que es urbana y edificada del total de las entidades, ya que, por ejemplo, Ciudad de México tiene más del 44 % de su superficie edificada, siendo la entidad con el valor más alto.

El crecimiento de la producción forestal maderable es un indicador relevante para evaluar el impacto en los recursos naturales y los bosques. Coahuila, Tabasco y Yucatán destacaron con tasas de crecimiento muy altas, lo que podría implicar una mayor explotación de recursos forestales en esas regiones. Además de la liberación de carbono a la atmósfera y su contribución al cambio climático, ya que la reducción de la superficie forestal disminuye la capacidad de la vegetación para absorber las emisiones de gases de efecto invernadero (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2019). Por otro lado, Ciudad de México, Baja California y Querétaro presentaron tasas negativas, lo que indicó una posible disminución de la producción maderable en esas áreas. Esto podría tener implicaciones importantes en la conservación y uso sustentable de los recursos forestales de la entidad; no obstante, podría representar presión sobre los recursos forestales maderables de otras entidades.

El crecimiento de la producción agrícola está relacionado con la presión sobre el suelo para actividades agrícolas y la disponibilidad de tierras para la producción de alimentos. Tlaxcala, Nayarit y Chihuahua tuvieron tasas de crecimiento muy altas, lo que sugiere un aumento significativo en la producción agrícola en esas regiones. Esto podría estar relacionado con el aumento de la demanda de alimentos y la expansión de cultivos. En contraste, Michoacán, Chiapas y Nuevo León presentaron tasas negativas, lo que podría indicar posibles desafíos en la producción agrícola en esas áreas y que tengan que importar de otros estados.

En cuanto al promedio anual de desastres por fenómenos hidrometeorológicos, reflejó la frecuencia de eventos climáticos extremos que pueden afectar directamente el uso y cobertura del suelo, así como la resiliencia de las regiones ante desastres naturales. Veracruz, Oaxaca, Chiapas, Guerrero y Chihuahua fueron las entidades con el promedio más alto de desastres de origen hidrometeorológico, lo que sugiere que estas regiones están más expuestas a eventos climáticos extremos. Esto podría influir en la planificación y manejo del suelo para reducir la vulnerabilidad ante desastres.

El promedio anual de emergencias por fenómenos hidrometeorológicos es un indicador que complementa al anterior, ya que muestra la cantidad promedio de emergencias que resultan de los eventos hidrome-

teorológicos. Veracruz, con más de 18 eventos anuales; Chihuahua, con más de 9; Durango y Oaxaca, con más de 6 emergencias al año; Sonora, Sinaloa, Zacatecas, Baja California Sur y Chiapas, con más de 5 emergencias tuvieron los promedios más altos de emergencias, lo que indicó una mayor incidencia de eventos climáticos que requieren acciones de respuesta y recuperación. Esto también puede tener implicaciones en la planificación del uso del suelo para reducir los riesgos asociados con los desastres naturales.

En resumen, estos indicadores proporcionan una visión amplia de la presión que enfrenta el uso y cobertura del suelo en diferentes regiones de México. La tasa de crecimiento del PIB, la población, la superficie urbana y edificada, así como la producción forestal y agrícola, son factores clave que influyen en el uso del suelo. Además, los promedios de desastres y emergencias hidrometeorológicas señalan la importancia de considerar la resiliencia y adaptación ante eventos climáticos extremos en la planificación territorial. Para una gestión adecuada del suelo, es crucial tomar en cuenta estos indicadores y desarrollar políticas sostenibles que promuevan un uso responsable y equitativo de los recursos naturales y territoriales en cada entidad federativa.

3.2 Indicadores de Estado

Quintana Roo, Campeche y Yucatán poseen más del 50 % de su superficie cubierta por bosques, mientras que Oaxaca, Chiapas y Colima tienen más del 30 % de esta cobertura. Lo anterior coincide con lo reportado por la SEMARNAT (2019), que ubicó a Quintana Roo, Campeche, Yucatán y Chiapas como entidades con mayores volúmenes maderables. La tasa de variación de la superficie de bosques muestra la tasa de cambio en la extensión de los bosques en las diferentes entidades federativas. Campeche presentó una tasa negativa de 3.53, Oaxaca tuvo un decrecimiento de 1.1702 en sus bosques, Chiapas 0.9512 y Quintana Roo obtuvo una tasa de variación negativa de 0.6822, lo que implicó una pérdida de superficie boscosa y posibles problemas de deforestación en esas áreas. Las entidades con tasas positivas poseían una cobertura de bosques muy pequeña, inferior al 1 % de sus superficies, por lo que no se consideraron relevantes.

El aumento en la superficie de humedales permanentes es un indicador positivo para la conservación de ecosistemas acuáticos. Tabasco fue la única entidad que mostró una tasa negativa, lo que sugirió la pérdida de estos valiosos ecosistemas en el estado. En contraste, Quintana Roo, Sinaloa, Nayarit, Yucatán y Campeche presentaron tasas positivas de aumento en la superficie de humedales permanentes, lo que podría indicar esfuerzos de conservación exitosos en esas regiones, sobre todo porque presentan extensiones territoriales superiores al 3 % del total de cada estado.

En lo que respecta a los matorrales, Baja California, Baja California Sur, Coahuila y Chihuahua tienen cubierto más del 40 % de su suelo, seguidos de Sonora y San Luis Potosí, con más del 30 %. Las tasas más altas de variación de la superficie de matorrales las presentaron Baja California Sur (13.55), Chihuahua (9.41), Baja California (7.10) y Sonora (4.19); por el contrario, Coahuila y San Luis Potosí presentaron tasas negativas con 6.79 y 0.94, respectivamente. Algo que cabe resaltar es que cuando la vegetación se compone de matorrales y es degradada, si no tiene intervención, esta misma se restablece de manera natural y es difícil determinar si es vegetación primaria o secundaria (SEMARNAT, 2019).

En cuanto a la mayor superficie cubierta por pastizales, destacan Nuevo León y Aguascalientes con más del 50 %, así como Tamaulipas y Querétaro con más del 40 %. La tasa de variación de esta superficie mostró valores negativos en Aguascalientes (8.85), Querétaro (6.42), Guanajuato (6.42), Tamaulipas (5.91) y Nuevo León (4.90), lo que podría indicar una disminución en la superficie de pastizales debido a la urbanización y cambios en el uso del suelo, aunque no se descarta el sobrepastoreo, ya que SEMARNAT (2019) indicó que en 2002 entidades como Chihuahua, Durango y Nuevo León tenían afectaciones por esta causa. Las entidades con tasas positivas poseen una cobertura de pastizales muy pequeña, inferior al 5 % de sus superficies, por lo que no se consideran relevantes. Los matorrales y pastizales característicos de las zonas áridas de México han sufrido deterioro debido a actividades antropogénicas como los usos agropecuarios, construcción, sequías, incendios, entre otros (SEMARNAT, 2019).

Las sabanas son ecosistemas importantes; Tabasco, Veracruz, Guerrero, Nayarit, Michoacán y Chiapas poseen más del 50 % de su superficie

cubierta por sabanas y su tasa de variación puede tener implicaciones significativas para la biodiversidad y el uso del suelo. Michoacán, Guerrero y Chiapas lideran con las tasas más altas de aumento en la superficie de sabanas. Sin embargo, algunos estados, como Yucatán (12.27), Tabasco (0.79), Nayarit (0.45) y Veracruz (0.22), presentan tasas negativas, lo que puede deberse a una pérdida en este tipo de cobertura del suelo.

Con respecto al uso del suelo como tierras de cultivo, Tlaxcala destinó más del 60 % de su superficie para este propósito, aunque es importante mencionar que ocupa el penúltimo lugar en extensión territorial con poco más de 4000 km². De manera similar, Morelos (con más de 4800 km²). Guanajuato y Sinaloa destinaron más del 30 % de sus tierras a cultivos y el Estado de México arriba del 28 %. Los resultados de Tlaxcala coinciden con lo reportado por la SEMARNAT (2019), que en 2014 ubicó a Tlaxcala como una entidad que transformó más del 60 % de su superficie para dedicarla a actividades agrícolas y pecuarias. La variación en la superficie de tierras de cultivo es relevante para la seguridad alimentaria y el uso del suelo agrícola. Coahuila (21.85 %), Chihuahua (18.54 %), Durango (8.07 %) y Sonora (7.54 %) presentaron tasas de variación positiva, lo que podría estar relacionado con la expansión de la agricultura en esas regiones. Por otro lado, Zacatecas, Ciudad de México (26.76 %), Colima (23.98 %), Michoacán (21.77 %), Guerrero (20.57 %) y Oaxaca (15.54 %) presentaron tasas negativas, lo que sugiere una disminución en la superficie de tierras de cultivo en esas áreas, posiblemente debido a cambios en las prácticas agrícolas o la urbanización.

Baja California poseía más del 18 % de su superficie con tierras estériles o con poca vegetación, al igual que Baja California Sur, con un valor por encima del 13 %. Dichas entidades obtuvieron una tasa de variación negativa del 9.79 % y 12.72 %. Los estados con tasas positivas podrían estar enfrentando problemas de degradación ambiental y pérdida de vegetación, mientras que los estados con tasas negativas podrían estar implementando prácticas efectivas de conservación y recuperación del suelo. Es importante analizar más a fondo las causas detrás de estas tendencias para diseñar políticas adecuadas de conservación y restauración del medio ambiente.

En cuanto a la precipitación media, Tabasco destacó como la entidad con los mayores valores en este indicador a nivel nacional, ya que

recibió anualmente más de 2000 milímetros (mm) de agua. Le siguió Chiapas con más de 1900 mm, Oaxaca con más de 1500 mm y Veracruz con más de 1400 mm. Por su parte, Puebla, Quintana Roo y Campeche registraron valores cercanos a los 1200 mm de precipitación, mientras que Guerrero, Nayarit y Yucatán recibieron más de 1000 mm anuales en promedio. En contraste, Baja California y Baja California Sur presentaron niveles considerablemente más bajos, con menos de 200 mm de precipitación anual. Colima (8.17 %) y Morelos (7.18 %) lideran las tasas más altas de variación en la precipitación media anual, lo que puede tener implicaciones importantes para la disponibilidad de agua y la gestión del suelo. Por otro lado, Oaxaca (1.91 %), San Luis Potosí (1.87 %), Hidalgo (1.49 %), Baja California (1.48 %) y la Ciudad de México (1.24 %) presentaron tasas negativas, lo que sugiere una disminución en la precipitación y posibles problemas de disponibilidad de agua o desertificación en esas áreas.

Durante el periodo de estudio, la temperatura media incrementó en más de 2 grados centígrados (°C) en entidades como Michoacán y Colima, y más de 1.5 °C en Durango, Querétaro, San Luis Potosí e Hidalgo. En las entidades de Baja California Sur, Tlaxcala y Sinaloa, el incremento fue de más de 1.3 °C. Lo anterior coincide con lo reportado por el IPCC (2019), que señaló que la temperatura media incrementó en un rango de 1.3 °C a 1.6 °C, desde 1850-1900 hasta 2006-2015. Mientras que Oaxaca y Guanajuato experimentaron incrementos de 0.3 °C y Veracruz de 0.4 °C. El aumento en la temperatura media anual es un indicador relevante del cambio climático y sus efectos en el ambiente y el uso del suelo. Michoacán y Durango lideraron con las tasas más altas de aumento en la temperatura, lo que puede tener impactos significativos en la agricultura y los ecosistemas. Por otro lado, Oaxaca, Guanajuato y Veracruz presentaron tasas relativamente bajas de aumento, lo que puede sugerir una menor vulnerabilidad a los efectos del cambio climático en esas áreas.

En este estudio no se emplearon datos de los incendios forestales debido a que se emplean las tasas de variación en la cobertura de la superficie y sería doble cuantificación; sin embargo, dañan especies vegetales y crean un ambiente adecuado para especies oportunistas, plagas invasoras y enfermedades forestales (SEMARNAT, 2019). Tampoco se emplearon datos de la superficie dedicada a la ganadería; SEMARNAT (2019)

señala que Sonora, Coahuila, San Luis Potosí, Zacatecas, Chihuahua y Nuevo León presentaron al 2012 mayores proporciones relativas a la superficie ganadera.

En resumen, los indicadores utilizados proporcionan una visión amplia de la situación del uso y cobertura del suelo en diferentes regiones de México. Los cambios en la superficie de bosques, humedales, matorrales, pastizales, sabanas y tierras de cultivo pueden tener implicaciones importantes para la biodiversidad, la seguridad alimentaria y el equilibrio ecológico. Además, las variaciones en la precipitación y la temperatura media anual reflejan los efectos del cambio climático en el país. Para una gestión adecuada del suelo, es fundamental considerar estos indicadores y desarrollar estrategias de conservación y uso sustentable que promuevan la resiliencia de los ecosistemas y la adaptación al cambio climático.

3.3 Indicadores de respuesta

Respecto a los instrumentos de cambio climático, en 2010, únicamente Veracruz contó con dos de ellos: el Programa Veracruzano ante el Cambio Climático de 2009 y el Fondo Ambiental Veracruzano (extinto en 2020). Mientras tanto, en ese mismo año, la Ciudad de México, Guanajuato, Quintana Roo y Yucatán contaron con un solo instrumento. En 2018, la situación mejoró significativamente, con la mayoría de las entidades federativas implementando instrumentos de cambio climático. Es importante destacar que el Estado de México alcanzó un nivel deseable al contar con 7 instrumentos; Guanajuato y San Luis Potosí poseían 6; Baja California, Chiapas, Chihuahua, Coahuila de Zaragoza, Jalisco, Michoacán de Ocampo, Oaxaca, Sonora y Tamaulipas tenían 5 instrumentos publicados. Por el contrario, Nayarit no contaba con algún instrumento y Nuevo León y Tabasco solo contaron con uno.

En cuanto a los instrumentos de emisiones y calidad del aire, en 2010 se observó una baja implementación de instrumentos de emisiones y calidad del aire, con solo nueve entidades (Baja California, Chihuahua, Ciudad de México, Coahuila, Guanajuato, Nuevo León, Puebla, Quintana Roo y Sonora) que contaron con un instrumento. En 2018, hubo una mejora notable, con 22 entidades que implementaron dos instrumentos y 10 que implementaron uno.

Sobre los instrumentos de manejo de residuos sólidos, en 2010, Ciudad de México, Guerrero y Quintana Roo contaron con el 100 % de los instrumentos, es decir, tres. Aguascalientes, Guanajuato, México, Michoacán, Puebla y Querétaro contaron con dos; diez entidades contaron con al menos uno y trece no contaban con alguno. En 2018, la implementación de instrumentos se mantuvo estable en las entidades que ya tenían tres, destacando Chihuahua y Tabasco, que pasaron de cero a tres; Jalisco y Tamaulipas, que avanzaron de uno a tres, y Querétaro, de dos a tres. 12 entidades contaron con uno instrumento, 11 con uno y Sonora permaneció con cero.

Finalmente, con respecto a la existencia de instrumentos de gestión territorial, en 2010, la mayoría de las entidades tenían instrumentos de gestión territorial, con un máximo de tres instrumentos implementados en la Ciudad de México e Hidalgo; Chiapas, Guerrero, Jalisco, Oaxaca, Puebla y Tabasco contaron con dos instrumentos, 13 entidades con un instrumento y 11 entidades no tenían algún instrumento de este rubro. En 2018, la implementación de instrumentos de gestión territorial aumentó en varias entidades, destacando Ciudad de México, Colima, Hidalgo, Querétaro y Veracruz con 4 instrumentos. Contrastando fuertemente con Chihuahua, Durango, Guanajuato, Sinaloa y Zacatecas, que solo tuvieron un instrumento. El IPCC (2019) señala que el cambio climático puede agravar los procesos de degradación del suelo. Esto se evidencia mediante aumentos en la intensidad de la lluvia, las inundaciones, la frecuencia y severidad de las sequías, la sobrecarga térmica, los periodos de sequía, entre otros. Dichos impactos están sujetos a la influencia de las prácticas de gestión de la tierra.

En general, se observa una mejora en la implementación de instrumentos en todos los indicadores entre 2010 y 2018. Sin embargo, aún existen entidades federativas que necesitan fortalecer su respuesta a los desafíos del cambio climático, calidad del aire, manejo de residuos sólidos y gestión territorial. Es importante continuar promoviendo políticas y estrategias para mejorar la situación ambiental y contribuir al desarrollo sustentable del país. Además, es relevante realizar un análisis cualitativo para comprender la efectividad y alcance real de estos instrumentos implementados en cada entidad.

4. Conclusiones

El crecimiento económico, medido por la tasa de crecimiento del PIB, está relacionado con el uso y cobertura del suelo, mostrando que entidades con tasas altas de crecimiento económico tienden a experimentar una mayor urbanización y cambios en la estructura productiva. El crecimiento de la población se asocia con una mayor presión sobre el suelo para la construcción de viviendas, infraestructuras y servicios, especialmente en regiones con altas tasas de crecimiento poblacional. El incremento de la superficie urbana y edificada está vinculado a la expansión de áreas urbanizadas y la construcción de infraestructuras, lo que puede afectar la calidad y disponibilidad del suelo para otros usos. El crecimiento de la producción forestal maderable y agrícola tiene implicaciones para los recursos naturales y los bosques, afectando su conservación y uso sustentable. Los promedios de desastres y emergencias hidrometeorológicas destacan la importancia de considerar la resiliencia y adaptación ante eventos climáticos extremos en la planificación territorial.

Los cambios en la superficie de bosques, humedales, matorrales, pastizales, sabanas y tierras de cultivo pueden tener implicaciones importantes para la biodiversidad, la seguridad alimentaria y el equilibrio ecológico en diferentes regiones del país. Las variaciones en la precipitación y la temperatura media anual reflejan los efectos del cambio climático en México, lo que puede tener impactos significativos en la agricultura y los ecosistemas.

La implementación de instrumentos de cambio climático, emisiones y calidad del aire, manejo de residuos sólidos y gestión territorial ha mostrado una mejora en general entre 2010 y 2018. Algunas entidades federativas aún necesitan fortalecer su respuesta a los desafíos ambientales y del cambio climático, ya que no cuentan con suficientes instrumentos implementados en diferentes áreas. Una línea de investigación sería sobre la aplicación de los instrumentos, ya que en este estudio solo se evaluó su existencia.

En general, los resultados muestran la compleja interacción entre factores económicos, demográficos, climáticos y políticas ambientales que afectan el uso y cobertura del suelo en México. El análisis de estos

indicadores proporciona una base importante para la toma de decisiones y el diseño de políticas sustentables que promuevan una gestión adecuada del suelo y la protección del medio ambiente en el país.

5. Referencias bibliográficas

- Grecchi, R. C., Gwyn, Q. H. J., Bénié, G. B., Formaggio, A. R., & Fahl, F. C. (2014). Land use and land cover changes in the Brazilian Cerrado: A multidisciplinary approach to assess the impacts of agricultural expansion. *Applied Geography*, 55, 300–312. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.09.014>.
- INECC (2023). Instrumentos de política climática. Disponible en: <https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/Instrumentos.html>. Consultado el 02 de julio de 2023.
- INEGI (2023). *Extensión territorial*. Cuentame de México. Territorio. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/extension/default.aspx?tema=T>. Consultado el 29 de junio de 2023.
- IPCC (2019). Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].
- Jatav, S. S. & Naik, K. (2023). Measuring the agricultural sustainability of India: An application of pressure-state-response model. *Regional Sustainability*, 4(3), 218-234. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2023.05.006>.
- Karnieli, A., Qin, Z.H., Wu, B. Panov, N. & Yan, F. (2014). Spatio-Temporal Dynamics of Land-Use and Land-Cover in the Mu Us Sandy Land, China, Using the Change Vector Analysis Technique. *Remote Sens.*, 6(10), 9316-9339.
- LGPC (2012). Diario Oficial de la Federación, México, 6 de junio de 2012.

- Lin, M., Hou, L., Qi, Z. & Wan, L. (2022). Impacts of climate change and human activities on vegetation NDVI in China's Mu Us Sandy Land during 2000–2019, *Ecological Indicators*, 142, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109164>.
- Löbmann, M. T., Maring, L., Prokop, G., Brils, J., Bender, J., Bispo, A. & Helming, K. (2022). Systems knowledge for sustainable soil and land management. *Science of The Total Environment*, 822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153389>.
- Nadal, A. y Aguayo, F. (2020). Los motores de la degradación ambiental: el modelo macroeconómico y la explotación de los recursos naturales en América Latina, serie Estudios y Perspectivas-Sede Subregional de la CEPAL en México, N° 185. Naciones Unidas. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Pérez-Vega, A., Regil, H. H., & Mas, J. F. (2020). Degradación ambiental por procesos de cambios de uso y cubierta del suelo desde una perspectiva espacial en el estado de Guanajuato, México. *Investigaciones geográficas*, (103), e60150. <https://doi.org/10.14350/rig.60150>.
- Sánchez, J. (2012). *Macroeconomía. Cuestiones y ejercicios*. Ediciones pirámide.
- SEMARNAT (2019). *Informe de la situación del medio ambiente en México, edición 2018*.
- Travieso-Bello, A. C. (2012). Aplicación del modelo Presión-Estado-Impacto-Respuesta al análisis de riesgos por inundaciones en la cuenca del río Nautla, Veracruz. En A. Tejeda, *Las inundaciones de 2010 en Veracruz. La biósfera, escenarios y herramientas*. Ciudad de México, México: Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico, pp. 90-125.
- Vázquez-Valencia, R. A. y García-Almada, R. M. (2018). Indicadores PER y FPEIR para el análisis de la sustentabilidad en el municipio de Cihuatlán, Jalisco, México. Nóesis. *Revista de ciencias sociales*, 27(53-1), 1-26. <https://doi.org/10.20983/noesis.2018.3.1>.
- Woodhouse, P., Howlett, D., Rigby, D. (2000). A Framework for Research on Sustainability Indicators for Agriculture and Rural Livelihoods, Sustainability Indicators for Natural Resource Management & Policy, *Working Paper 2*, Department of International Development Research, Bradford.