



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRIA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS



**CAMBIOS EN EL USO DE SUELO EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ Y
SU EFECTO SOBRE EL CLIMA**

Por:

I.G. Juan José Silva Gallegos

**Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de
Maestro en Ciencias Agropecuarias**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRIA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS



**CAMBIOS EN EL USO DE SUELO EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ Y
SU EFECTO SOBRE EL CLIMA**

Por:

I.G. Juan José Silva Gallegos

**Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de
Maestro en Ciencias Agropecuarias**

Director de Tesis

Dr. Heriberto Méndez Cortés

Co-director de Tesis

Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda

Asesores

Dra. Catarina Loredo Osti

Dr. José Antonio Ávalos Lozano



Cambios en el Uso de Suelo en el Estado de San Luis Potosí y su efecto sobre el clima by Juan José Silva Gallegos is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y a la Facultad de Agronomía y Veterinaria por confiar en mí y aceptarme, además de todos los excelentes profesores que compartieron sus conocimientos y su valioso tiempo durante mi estancia en la Universidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (No. CVU 1076597) para la realización de mis estudios

A las dependencias e instituciones gubernamentales que son generadoras de información y que sin ellas este tipo de trabajos no sería posible. En el ámbito nacional se encuentran el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); mientras que en el ámbito internacional se encuentra la Oficina de Asimilación y Modelado Global de la NASA (GMAO), el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), el Instituto Internacional de Investigaciones para el Clima y la Sociedad (IRI), entre otras.

Al Dr. Víctor Orlando Magaña-Rueda, quien fue mi profesor durante mi estancia en la Universidad, siendo parte fundamental en el trabajo realizado, así por sus acertados comentarios y sugerencias en todo el desarrollo de la presente investigación.

Al Dr. Heriberto Méndez-Cortés, por los valiosos comentarios y sugerencias que enriquecieron este trabajo de investigación, así como sus conocimientos cuando fue mi profesor en la Universidad.

A la Dra. Catarina Loredo-Osti, por la valiosa disponibilidad para revisar este trabajo de manera detallada, así como los valiosos comentarios y observaciones que mejoraron la calidad y enfoque del presente trabajo.

Al Dr. José Antonio Ávalos-Lozano y al equipo que conforma el Centro Nacional de Variabilidad Climática, Teledetección y Evaluación de Riesgos Agrícolas (VARICLIM), por las facilidades brindadas para el desarrollo de este proyecto, así como sus valiosos comentarios y observaciones al presente trabajo.

CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	xi
SUMMARY.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
Hipótesis.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos específicos.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Pérdida y Alteración de los Ecosistemas	4
Ecosistemas.....	4
Servicios ecosistémicos.....	5
Perturbaciones.....	15
Deforestación.....	18
Usos de suelo y vegetación.....	20
Políticas públicas en México.....	21
Climatología Ecológica.....	22
Interacción biósfera-atmósfera.....	22
Clima.....	24
Procesos físicos.....	26
MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
Descripción del Área de Estudio.....	31
Insumos y Análisis de Datos.....	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
CONCLUSIONES.....	83
LITERATURA CITADA.....	85

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Aprovisionamiento – Nutrición en los Servicios Ecosistémicos.	6
2	Aprovisionamiento – Materiales de los Servicios Ecosistémicos.....	7
3	Aprovisionamiento – Energía de los Servicios Ecosistémicos....	8
4	Regulación y Mantenimiento – Mediación de residuos, tóxicos y otras molestias de los Servicios Ecosistémicos.....	9
5	Regulación y Mantenimiento – Mediación de flujos de los Servicios Ecosistémicos.....	10
6	Regulación y Mantenimiento – Mantenimiento de condiciones físicas, químicas, biológicas de los Servicios Ecosistémicos.....	11
7	Cultural – Interacciones físicas e intelectuales con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos (entornos ambientales) de los Servicios Ecosistémicos.....	13
8	Cultural – Interacciones espirituales, simbólicas y de otro tipo con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos (entornos ambientales) de los Servicios Ecosistémicos.....	14
9	Matriz de transición para el Uso de Suelo, 1993-2018.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Características espaciales y temporales de algunas perturbaciones naturales y antropogénicas.....	15
2	Sucesión de ecosistemas en función de elementos estructurales y funcionales.....	18
3	Deforestación de bosque primario en México.....	19
4	Dinámica clima-vegetación.....	23
5	Efectos climáticos de la deforestación.....	24
6	Esquema de las condiciones de El Niño.....	26
7	Albedo superficial y radiación neta.....	27
8	Impactos climáticos superficiales de un aumento en el albedo...	28
9	Humedad del suelo, evapotranspiración y precipitación.....	29
10	Impactos climáticos superficiales de una disminución en la humedad del suelo.....	29
11	Rugosidad superficial y mezcla turbulenta.....	30
12	Impactos climáticos de la superficie de una disminución en la rugosidad de la superficie.....	30
13	Localización del área de estudio. A) Contexto nacional; B) Nivel estatal.....	31
14	Uso de suelo y vegetación. Serie VII.....	32
15	Definiciones de escala y las escalas características de tiempo y longitud horizontal de una variedad de fenómenos atmosféricos.....	33
16	Distribución espacial de estaciones climatológicas.....	34
17	Temperatura de superficie anual (°C), 1980-2019. MERRA-2...	35
18	Temperatura cerca de superficie (2m) anual (°C),1980-2019. CFSR.....	36
19	Temperatura de superficie anual (°C), 1980-2019. ERA5.....	36

20	Índice de vegetación mejorado. 2017-2019.....	38
21	Matriz de transición.....	39
22	Principales usos de suelo y vegetación para el período 1985-2018 en San Luis Potosí.....	42
23	Indicadores de superficie cambiada para el período 1993-2018 en San Luis Potosí.....	43
24	Representación espacial de indicadores de cambios, 1993-2018	44
25	Cambio neto de uso de suelo y vegetación, 1993-2018.....	45
26	Comparativa del índice de vegetación mejorado para el periodo 1985-2018.....	48
27	Comparativa del índice de humedad de diferencia normalizada para el periodo 1985-2018.....	49
28	Comparativa de temperatura (°C) y precipitación (mm/año) del periodo 1980-1999 y 2000-2019. A) ERA5; B) CFSR; y C) MERRA-2.....	50
29	Anomalías de temperatura superficial (°C) con MERRA-2	51
30	Anomalías de precipitación (mm/año) acumulada con MERRA-2.....	52
31	Temperatura máxima. Los valores medios y desviación estándar por estación.....	54
32	Temperatura mínima. Los valores medios y desviación estándar por estación.....	55
33	Distribuciones de probabilidad y serie de tiempo para la estación 24025. A) Temperatura máxima (°C); B) Temperatura mínima (°C); y C) Precipitación (mm).....	56
34	Diagrama Cajas y Bigotes para la estación 24025. Temperatura mínima y máxima.....	57
35	Histograma y frecuencia relativa acumulada para Precipitación en la estación 24025.....	57

36	Distribuciones de probabilidad y serie de tiempo para la estación 24066. A) Temperatura máxima (°C); B) Temperatura mínima (°C); y C) Precipitación (mm).....	58
37	Diagrama Cajas y Bigotes para la estación 24066. Temperatura mínima y máxima.....	59
38	Histograma y frecuencia relativa acumulada para Precipitación en la estación 24066.....	59
39	Distribuciones de probabilidad y serie de tiempo para la estación 24106. A) Temperatura máxima (°C); B) Temperatura mínima (°C); y C) Precipitación (mm).....	60
40	Diagrama Cajas y Bigotes para la estación 24106. Temperatura mínima y máxima.....	61
41	Histograma y frecuencia relativa acumulada para Precipitación en la estación 24106.....	61
42	Distribuciones de probabilidad y serie de tiempo para la estación 24073. A) Temperatura máxima (°C); B) Temperatura mínima (°C); y C) Precipitación (mm).....	62
43	Diagrama Cajas y Bigotes para la estación 24073. Temperatura mínima y máxima.....	63
44	Histograma y frecuencia relativa acumulada para Precipitación en la estación 24073.	63
45	Distribuciones de probabilidad y serie de tiempo para la estación 24033. A) Temperatura máxima (°C); B) Temperatura mínima (°C); y C) Precipitación (mm).....	64
46	Diagrama Cajas y Bigotes para la estación 24033. Temperatura mínima y máxima.....	65
47	Histograma y frecuencia relativa acumulada para Precipitación en la estación 24033.....	65
48	Sitios evaluados en relación cambio de uso de suelo y clima...	66
49	Relación de vegetación con la temperatura máxima, Sitio 1.....	67
50	Relación de vegetación con la temperatura máxima, Sitio 2.....	67

51	Relación de vegetación con la temperatura máxima, Sitio 3.....	68
52	Relación de vegetación con la temperatura máxima, Sitio 4.....	68
53	Comparativa de Radiación Neta entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020.....	70
54	Comparativa entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020. A) Temperatura de superficie; B) Velocidad de viento; C) Flujo de calor latente superficial hacia arriba; y D) Flujo de calor sensible superficial hacia arriba.....	71
55	Comparativa entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020. A) Humedad específica; B) Evaporación; y C) Precipitación.....	72
56	Comparativa estacional entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020 para precipitación. A) Invierno; B) Primavera; C) Verano; y D) Otoño.....	73
57	Comparativa estacional entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020 para humedad específica entre los 1000 y 850 milibares. A) Invierno; B) Primavera; C) Verano; y D) Otoño.....	74
58	Comparativa estacional entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020 para evaporación. A) Invierno; B) Primavera; C) Verano; y D) Otoño.....	75
59	Comparativa estacional entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020 para temperatura de superficie. A) Invierno; B) Primavera; C) Verano; y D) Otoño.....	76
60	Comparativa estacional entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020 para velocidad de viento a 925 milibares. A) Invierno; B) Primavera; C) Verano; y D) Otoño.....	77
61	Comparativa estacional entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020 para el flujo de calor sensible hacia arriba de la superficie. A) Invierno; B) Primavera; C) Verano; y D) Otoño.....	78
62	Comparativa estacional entre los periodos 1980-1985 y 2015-2020 para el flujo de calor latente superficial hacia arriba. A) Invierno; B) Primavera; C) Verano; y D) Otoño.....	79

RESUMEN

La mayoría de los ecosistemas no están en equilibrio ya que cambian con el tiempo o se encuentran en recuperación de perturbaciones pasadas. La alteración de un ecosistema, específicamente de la cobertura de la superficie de la tierra por cambios en el uso de suelo y vegetación se ha convertido en una de las fuerzas impulsoras del cambio climático. Este trabajo muestra como los cambios en la cobertura forestal han modificado las propiedades físicas de la superficie afectando el clima de diferentes regiones del estado de San Luis Potosí (México). Para cuantificar los cambios de uso de suelo y vegetación, se empleó una matriz de transición. En la detección de cambios en el clima, se analizaron las variaciones de las estadísticas climatológicas mediante cálculos de anomalías climáticas y de patrones de desplazamiento. Los resultados mostraron que los patrones temporales de cambio de uso de suelo y vegetación a nivel estado están dominados por sucesiones naturales, pero en su mayoría por perturbaciones humanas. Actualmente, en San Luis Potosí los usos de suelo predominantes son los matorrales con una tendencia a la baja y la agricultura con tendencia al alza en superficie. Los resultados del trabajo indican que, en la Región Huasteca, la principal fuerza impulsora de cambio de la Región es el hombre. En cuanto a clima, los resultados estiman un aumento en la temperatura en toda la Región, pero con distintas intensidades, siendo la zona noroeste la que ha presentado un mayor calentamiento. Por otra parte, en el caso de la precipitación, se detecta una ligera disminución en la zona este de San Luis Potosí, así como un ligero aumento en la precipitación para la zona oeste. Finalmente, este trabajo muestra la influencia de los cambios de uso de suelo y vegetación en la atmósfera, siendo un factor importante en la modificación del clima en el estado de San Luis Potosí.

Palabras clave: Servicios ecosistémicos, Uso de suelo, Deforestación, Biósfera-Atmósfera y Clima.

SUMMARY

Most ecosystems are not in equilibrium as they change over time or are recovering from past disturbances. The ecosystem alteration, specifically the cover of the earth's surface due to changes in land use and vegetation, has become one of the driving forces of climate change. This research, shows how changes in forest cover have modified the physical properties of the surface, affecting the climate of different regions of San Luis Potosí, State (Mexico). To quantify changes in land use and vegetation, a transition matrix was used. In the detection of changes in the climate, the variations of the climatological statistics were analyzed through calculations of climatic anomalies and displacement patterns. The results showed that temporal patterns of land use and vegetation change at the state level are dominated by natural successions, but mostly by human disturbances. Currently, in San Luis Potosí State, the predominant land uses are thickets with a descendent trend and agriculture with an upward trend in surface area. The results of this research indicate that, in the Huasteca Region, the main driving force of change in the region is the human activities. In terms of climate, the results estimate an increase in temperature throughout the Region, but with different intensities, with the Northwest zone being the one that has shown the greatest warming. On the other hand, in the case of precipitation, a slight decrease is detected in the Eastern zone of San Luis Potosí, as well as a slight increase in precipitation for the Western zone. Finally, this work shows the influence of changes in land use and vegetation in the atmosphere, being an important factor in the modification of the climate in San Luis Potosí State.

Keywords: Ecosystem services, Land use, Deforestation, Biosphere-Atmosphere and Climate.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres son una parte integral del sistema Tierra, ya que modulan el intercambio de energía, agua y gases de efecto invernadero entre la superficie de la tierra y la atmósfera. Además, brindan servicios a la sociedad (Kyker-Snowman *et al.*, 2022) que han permitido el desarrollo de las sociedades. En ocasiones, la vegetación de un sitio se ve como un sistema estable o cercano al equilibrio. Sin embargo, la mayoría de los ecosistemas no están en equilibrio ya que cambian en diversas escalas de tiempo, ya sea por alteraciones permanentes o porque se encuentran en recuperación de perturbaciones pasadas (Kröel-Dulay *et al.*, 2015). En las últimas décadas, los ecosistemas han sido modificados drásticamente por actividades antropogénicas para satisfacer las necesidades humanas (Hoque *et al.*, 2022), a costa de perder servicios ecosistémicos.

La deforestación es uno de los problemas más marcados que causa grandes cambios en la estructura y funcionamiento de un ecosistema (Monjardin-Armenta *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Xiao *et al.*, 2020). La expansión agrícola es una gran amenaza para la conservación de la biodiversidad en el mundo debido a la deforestación; actualmente, alrededor de las tres cuartas partes de los bosques del planeta han desaparecido por esta causa (Ochoa-Noriega *et al.*, 2021). La creciente demanda de productos agrícolas determina la dinámica del uso de la tierra, la pérdida de biodiversidad y la degradación del hábitat, que compromete la tierra dedicada al consumo de diversos bienes en todo el mundo (Bonilla-Moheno *et al.*, 2020).

La influencia de los ecosistemas en el tiempo y el clima a través de intercambios de energía, humedad y momento entre la superficie terrestre y la atmósfera pueden ir de un período de segundos a años (Pielke *et al.*, 2003). La alteración de la cobertura de la superficie de la tierra por cambios en el uso de suelo y la vegetación se ha convertido en una de las principales fuerzas impulsoras del cambio climático a diversos niveles, comparado con los forzamientos más conocidos, cómo generados por la concentración de gases de efecto invernadero, los aerosoles o la variabilidad solar (Bonan, 2015; Li *et al.*, 2020; Achugbu *et al.*, 2021; Glotfelty *et al.*, 2021; Yan *et al.*, 2021). La conversión de bosques y pastizales en tierras de cultivo altera el sistema climático a escalas regionales y locales al modificar las propiedades físicas de la tierra, ya que altera el balance de la

radiación, por afectaciones en la partición de la energía en calor sensible y latente, y altera también el balance hidrológico y su efecto en el agua del suelo, evapotranspiración y escorrentía. Entre las características de la superficie afectadas por el cambio de la cobertura del suelo se encuentran el albedo, la rugosidad de la superficie, el índice de área foliar, la conductancia del dosel, la profundidad de las raíces y la textura, y la estructura del suelo (Bonan, 2015; Kyker-Snowman *et al.*, 2022).

Los cambios en el clima causados por el cambio de uso de suelo y vegetación es de gran interés científico ya que implica complejas relaciones entre el tipo de cambio inducido y la respuesta, muchas veces no lineal del clima. Las retroalimentaciones de la biosfera y la atmósfera están generalizadas a nivel mundial y son fuertes a nivel regional, siendo la vegetación un factor importante para modular los flujos de agua y energía del suelo hacia la atmósfera, lo que a su vez afecta las condiciones climáticas, llegando a explicar el 30 % de los cambios en la nubosidad y la precipitación y, por tanto, generando variaciones de la radiación neta superficial (Green *et al.*, 2017). A nivel local, cuando hay una transición de bosque a agricultura, aumenta el albedo y esta pérdida de energía enfría la superficie; De forma similar, la disminución de área foliar y la resistencia de los estomas frente al calor, reducen la transpiración, reducen el enfriamiento por evapotranspiración, generando por lo tanto un calentamiento (Prevello *et al.*, 2019; Jach *et al.*, 2020). El efecto neto de los cambios en la vegetación sobre el clima dependerá de cuál de estos procesos domine el sitio.

Desde hace varias décadas, el entender las interacciones atmósfera biosfera ha sido un problema científico de gran importancia, principalmente por sus efectos como mecanismo de cambio climático. Comprender los patrones en la vegetación, como la distribución espacial y temporal de los organismos ayuda a entender los procesos que gobiernan sus patrones que a su vez afectan el estado físico de la atmósfera (Bonan, 2015). El demostrar que el clima ha cambiado en algún sentido estadístico definido sin proporcionar una razón para ese cambio se le define como detección, mientras que el proceso de establecer las causas más probables de un cambio detectado con cierto nivel de confianza se le conoce como atribución (Hidalgo *et al.*, 2009; Stott *et al.*, 2010; Blindoff *et al.*, 2013; Knutson *et al.*, 2017).

Por ello, la generación de información significativa en cuanto a cambios de uso de suelo es de vital importancia para tomadores de decisiones para que formulen políticas públicas para proteger la vegetación y eviten o minimicen el impacto negativo de la deforestación en el clima, el medio ambiente y la sociedad (Santos *et al.*, 2020). Este trabajo trata de evidenciar los posibles efectos del cambio en el uso de suelo y vegetación en el clima del estado de San Luis Potosí.

Hipótesis

Los cambios en el uso de suelo han producido cambios climáticos a escala regional y local en el estado de San Luis Potosí que pueden ser detectados y atribuidos a las alteraciones en albedo, humedad del suelo y rugosidad, lo que puede explicar los contrastes en las tendencias climáticas.

Objetivo General

Mostrar que las principales tendencias del clima regional se deben a los cambios de uso de suelo en décadas recientes, que se relacionan con cambios en albedo, humedad del suelo y rugosidad, lo que ha resultado en cambios en temperatura máxima y mínima y precipitación.

Objetivos específicos

- Mostrar que los cambios de temperatura máxima y mínima se deben a cambios en el albedo y la humedad del suelo asociados a la deforestación.
- Mostrar que los cambios en la precipitación están relacionados con cambios en la convergencia de humedad, que a su vez se deben a cambios de rugosidad.
- Mostrar que los cambios de uso de suelo pueden tener un mayor impacto en el clima del estado de San Luis Potosí que la señal de cambio climático global.

REVISIÓN DE LITERATURA

Pérdida y Alteración de los Ecosistemas

Ecosistemas

El concepto de ecosistema ha evolucionado desde su primera aproximación en la década de 1930's en que Tansley (1935) hacía referencia al concepto de unidad de los organismos y su ambiente o entorno, como la unidad básica de la naturaleza. Odum (1971) definió a un ecosistema como una unidad del sistema funcional con entradas y salidas de energía con límites naturales o arbitrarios. La unidad está integrada por organismos en un área dada, que interactúan entre ellos y con el ambiente físico en diversas escalas de espacio y tiempo (Odum *et al.*, 2005).

Los estudios de los ecosistemas se enfocan en cuantificar patrones y procesos que gobiernan el almacenamiento, flujos de energía y materiales a través de las actividades colectivas de la biota, donde las interacciones implican procesos de retroalimentación positivos y negativos cuando cambian las condiciones del sistema, siendo dichas retroalimentaciones el centro de la estructura ecológica del ecosistema (Kominoski *et al.*, 2018; Jaibi *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2021).

Los flujos de energía y materiales a través de los organismos y el entorno físico proporcionan un marco para comprender la diversidad de formas y funcionamiento de los procesos físicos y biológicos de la tierra, siendo los componentes abióticos (agua y atmósfera) y bióticos (plantas, animales y microorganismos) esenciales en los ecosistemas (Chapin *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2021).

Los ecosistemas no son entidades estáticas, sino que están en un continuo cambio. Las tasas de cambio de los ecosistemas se modifican frecuentemente por fluctuaciones en el medio ambiente y por las actividades de organismos en escalas de tiempo que van desde microsegundos hasta millones de años que trastornan la estructura y composición de los ecosistemas alterando las funciones (intercambios de energía, materiales) y servicios (ecosistémicos) (Chapin *et al.*, 2011; Virginia *et al.*, 2013; Bonan, 2015). Por ello, cambios en el entorno cómo son los asociados con el uso de suelo, pueden afectar las

condiciones de los microclimas y dependiendo de la extensión de la afectación en el territorio, pueden ser de escala local y regional.

Servicios ecosistémicos

El concepto de servicios ecosistémicos se desarrolló para concientizar a la sociedad sobre la importancia de los ecosistemas naturales y los beneficios que generan al ser humano con el objetivo de la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas como un modelo importante para vincular el funcionamiento de los ecosistemas con el bienestar humano (Birkhofer *et al.*, 2015; Winter *et al.*, 2018; Riss *et al.*, 2020). Entonces, los servicios ecosistémicos se pueden describir como un conjunto de propiedades ambientales derivadas de estructuras y procesos ecosistémicos que se ordenan desde una perspectiva antropocéntrica: describen interacciones ecológicas complejas que son útiles y necesarias para el bienestar humano (Riss *et al.*, 2020; Hoque *et al.*, 2022).

Los servicios de aprovisionamiento comprenden todas las salidas materiales de los procesos de los ecosistemas que se utilizan para la nutrición humana, el procesamiento y el uso de energía (Cuadro 1-3). Los servicios de regulación son los beneficios que obtienen las personas debido a la regulación de los procesos naturales y el control o modificación de los factores bióticos y abióticos (Cuadros 4-6). Los servicios ecosistémicos culturales son los beneficios intangibles que las personas obtienen de los ecosistemas en forma de experiencias espirituales, religiosas, inspiradoras y educativas no materiales (Cuadro 7-8) (Müller *et al.*, 2015; Rolando *et al.*, 2017; Hoque *et al.*, 2022).

Los servicios ecosistémicos han sido drásticamente alterados en las últimas décadas. Los cambios en el uso de suelo y vegetación son el factor más importante en modificar los servicios de provisión, apoyo y regulación. La demanda de los seres humanos en ciertos servicios induce cambios en el funcionamiento y la resiliencia de los ecosistemas, lo que conducirá a una disminución en la disponibilidad de algunos recursos biológicos y servicios ecológicos (Pereira *et al.*, 2005; Barbier *et al.*, 2015; Mackay, 2015; Balvanera *et al.*, 2017; Hoque *et al.*, 2022).

Cuadro 1. Aprovechamiento – Nutrición en los Servicios Ecosistémicos.

	División	Grupo	Clase	Tipo de clase	Ejemplos
Aprovechamiento	Nutrición	Biomasa	Cultivos cultivados	Cultivos por cantidad, tipo	Cereales (por ejemplo, trigo, centeno, apenas), verduras, frutas, etc.
			Animales criados y sus productos	Animales, productos por cantidad, tipo	Carne, productos lácteos (leche, queso, yogur), miel, etc.
			Plantas silvestres, algas y sus productos	Plantas, algas por cantidad, tipo	Bayas silvestres, frutas, champiñones, berros de agua, salicornia (hierba salada o samphire); algas marinas (por ejemplo, Palmaria palmata) para alimentos.
			Animales salvajes y sus productos	Animales por cantidad, tipo	Caza, peces de agua dulce (trucha, anguila, etc.), peces marinos (solla, lubina, etc.) y mariscos (es decir, crustáceos, moluscos), así como equinodermos o miel cosechados de poblaciones silvestres; Incluye la pesca comercial y de subsistencia y la caza para la alimentación.
			Plantas y algas de la acuicultura in situ	Plantas, algas por cantidad, tipo	Cultivo in situ de algas marinas.
			Animales de la acuicultura in situ	Animales por cantidad, tipo	Cultivo in situ de agua dulce (por ejemplo, trucha) y peces marinos (por ejemplo, salmón, atún) también en jaulas flotantes; acuicultura de mariscos (por ejemplo, ostras o crustáceos) en, por ejemplo, postes.
		Agua	Aguas superficiales para beber	Por importe, tipo	Precipitaciones recolectadas, aguas superficiales extraídas de ríos, lagos y otros cuerpos de agua abiertos para beber.
			Agua subterránea para beber		Agua dulce extraída de capas de agua subterránea (no fósiles) o a través de la desalinización de aguas subterráneas para beber.

Fuente: Adaptado de la Clasificación Internacional Común de Informe de Servicios Ecosistémicos (CICES Versión. 4.3) <https://cices.eu>.

Cuadro 2. Aprovechamiento – Materiales de los Servicios Ecosistémicos.

	División	Grupo	Clase	Tipo de clase	Ejemplos
Aprovechamiento	Materiales	Biomasa	Fibras y otros materiales procedentes de plantas, algas y animales para uso o transformación directos	Material por cantidad, tipo, uso, medios (tierra, suelo, agua dulce, marina)	Fibras, madera, flores, piel, huesos, esponjas y otros productos, que no se transforman posteriormente; material para la producción, por ejemplo, productos industriales como celulosa para papel, algodón para ropa, material de embalaje; productos químicos extraídos o sintetizados de algas, plantas y animales como trementina, caucho, lino, aceite, cera, resina, jabón (a partir de huesos), remedios naturales y medicamentos (por ejemplo, condrina de tiburones), colorantes y colorantes, ámbar gris (de cachalotes utilizados en perfumes); Incluye usos ornamentales consuntivos.
			Materiales de plantas, algas y animales para uso agrícola		Material vegetal, alga y animal (por ejemplo, pasto) para forraje y fertilizantes en la agricultura y la acuicultura.
			Materiales genéticos de toda la biota		Material genético (ADN) de plantas, algas y animales silvestres para procesos bioquímicos industriales y farmacéuticos, por ejemplo, medicamentos, fermentación, desintoxicación; actividades de bioprospección, por ejemplo, especies silvestres utilizadas en programas de mejoramiento, etc.
		Agua	Aguas superficiales para fines no potables	Por cantidad, tipo y uso	Precipitaciones recogidas, aguas superficiales extraídas de ríos, lagos y otros cuerpos de agua abiertos para uso doméstico (lavado, limpieza y otros usos no potables), riego, consumo de ganado, uso industrial (consumo y refrigeración), etc.
			Aguas subterráneas para fines no potables		Agua dulce extraída de capas de agua subterránea (no fósiles) o a través de la desalinización de aguas subterráneas para uso doméstico (lavado, limpieza y otros usos no potables), riego, consumo de ganado, uso industrial (consumo y refrigeración), etc.

Fuente: Adaptado de la Clasificación Internacional Común de Informe de Servicios Ecosistémicos (CICES Versión. 4.3) <https://cices.eu>.

Cuadro 3. Aprovisionamiento – Energía de los Servicios Ecosistémicos.

	División	Grupo	Clase	Tipo de clase	Ejemplos
Aprovisionamiento	Energía	Fuentes de energía basadas en biomasa	Recursos de origen vegetal	Por cantidad, tipo, fuente	Combustible de madera, paja, plantas de energía, cultivos y algas para la quema y producción de energía.
			Recursos de origen animal		Estiércol, grasa, aceites, cadáveres de animales terrestres, acuáticos y marinos para la quema y producción de energía.
		Energía mecánica	Energía de origen animal	Por cantidad, tipo, fuente	Trabajo físico proporcionado por animales (caballos, elefantes, etc.).

Fuente: Adaptado de la Clasificación Internacional Común de Informe de Servicios Ecosistémicos (CICES Versión. 4.3) <https://cices.eu>.

Cuadro 4. Regulación y Mantenimiento – Mediación de residuos, tóxicos y otras molestias de los Servicios Ecosistémicos.

	División	Grupo	Clase	Tipo de clase	Ejemplos
Regulación y Mantenimiento	Mediación de residuos, tóxicos y otras molestias	Mediación por biota	Biorremediación por microorganismos, algas, plantas y animales	Por cantidad, tipo, uso, medios (tierra, suelo, agua dulce, marina)	Desintoxicación/descomposición/mineralización bioquímica en la tierra/suelo, agua dulce y sistemas marinos, incluidos los sedimentos; descomposición/desintoxicación de residuos y materiales tóxicos, por ejemplo, limpieza de aguas residuales, degradación de derrames de petróleo por bacterias marinas, (fito)degradación, (rizo)degradación, etc.
			Filtración/secuestro/almacenamiento/acumulación por microorganismos, algas, plantas y animales	Por cantidad, tipo, uso, medios (tierra, suelo, agua dulce, marina)	Filtración biológica/secuestro/almacenamiento/acumulación de contaminantes en la biota terrestre/terrestre, de agua dulce y marina, adsorción y unión de metales pesados y compuestos orgánicos en la biota.
		Mediación por ecosistemas	Filtración/secuestro/almacenamiento/acumulación por ecosistemas	Por cantidad, tipo, uso, medios (tierra, suelo, agua dulce, marina)	Filtración/secuestro/almacenamiento/acumulación biofisiológico-químicos en los ecosistemas terrestres/terrestres, de agua dulce y marinos, incluidos los sedimentos; adsorción y unión de metales pesados y compuestos orgánicos en los ecosistemas (combinación de factores bióticos y abióticos).
			Dilución por ecosistemas atmosféricos, de agua dulce y marinos		Dilución biofisiológico-química de gases, fluidos y residuos sólidos, aguas residuales en atmósfera, lagos, ríos, mar y sedimentos.
			Mediación de impactos olfativos/ruidos/visuales		Proyección visual de corredores de transporte, por ejemplo, por árboles; Infraestructura verde para reducir el ruido y los olores.

Fuente: Adaptado de la Clasificación Internacional Común de Informe de Servicios Ecosistémicos (CICES Versión. 4.3) <https://cices.eu>.

Cuadro 5. Regulación y Mantenimiento – Mediación de flujos de los Servicios Ecosistémicos.

	División	Grupo	Clase	Tipo de clase	Ejemplos
Regulación y Mantenimiento	Mediación de flujos	Flujos máxicos	Estabilización de masas y control de los índices de erosión	Mediante la reducción del riesgo, área protegida	Protección contra erosión / deslizamiento de tierra / flujo por gravedad; cubierta vegetal protegiendo/estabilizando los ecosistemas terrestres, costeros y marinos, humedales costeros, dunas; vegetación en laderas que también previene avalanchas (nieve, roca), protección contra la erosión de costas y sedimentos por manglares, pastos marinos, macroalgas, etc.
			Amortiguación y atenuación de los flujos máxicos		Transporte y almacenamiento de sedimentos por ríos, lagos, mar.
		Flujos de líquidos	Ciclo hidrológico y mantenimiento del flujo de agua	Por profundidad/ volúmenes	Capacidad de mantener los flujos de referencia para el suministro y la descarga de agua; por ejemplo, fomentar las aguas subterráneas; recargar mediante una cobertura adecuada de la tierra que capture precipitaciones efectivas; incluye aspectos de sequía y escasez de agua.
			Protección contra inundaciones	Mediante la reducción del riesgo, área protegida	Protección contra inundaciones mediante una cobertura adecuada de la tierra; prevención de inundaciones costeras por manglares, pastos marinos, macroalgas, etc. (complementario a la protección costera por humedales, dunas).
		Flujos gaseosos / de aire	Protección contra tormentas	Mediante la reducción del riesgo, área protegida	Vegetación natural o plantada que sirve como cinturones de refugio.
			Ventilación y transpiración	Por cambio de temperatura/ humedad	Vegetación natural o plantada que permite la ventilación del aire.

Fuente: Adaptado de la Clasificación Internacional Común de Informe de Servicios Ecosistémicos (CICES Versión. 4.3) <https://cices.eu>.

Cuadro 6. Regulación y Mantenimiento – Mantenimiento de condiciones físicas, químicas, biológicas de los Servicios Ecosistémicos.

	División	Grupo	Clase	Tipo de clase	Ejemplos
Regulación y Mantenimiento	Mantenimiento de condiciones físicas, químicas, biológicas	Mantenimiento del ciclo de vida, protección del hábitat y del acervo	Polinización y dispersión de semillas	Por cantidad y fuente	Polinización por abejas y otros insectos; dispersión de semillas por insectos, aves y otros animales
			Mantenimiento de poblaciones y hábitats de viveros	Por cantidad y fuente	Hábitats para el vivero y la reproducción de plantas y animales, por ejemplo, pastos marinos, microestructuras de ríos, etc.
		Control de plagas y enfermedades	Control de plagas	Por reducción de incidencia, riesgo, área protegida	Control de plagas y enfermedades, incluidas las especies exóticas invasoras
			Control de enfermedades		En ecosistemas cultivados y naturales y poblaciones humanas
		Formación y composición del suelo	Procesos de meteorización	Por cantidad/ concentración y fuente	Mantenimiento de las condiciones biogeoquímicas de los suelos, incluida la fertilidad, el almacenamiento de nutrientes o la estructura del suelo; incluye la meteorización biológica, química, física y la pedogénesis
			Procesos de descomposición y fijación		Mantenimiento de las condiciones biogeoquímicas de los suelos por descomposición/mineralización de material orgánico muerto, nitrificación, desnitrificación, etc.), fijación de N y otros procesos biogeoquímicos
		Condiciones del agua	Estado químico de las aguas dulces	Por cantidad/ concentración y fuente	Mantenimiento / amortiguación de la composición química de la columna de agua dulce y sedimentos para garantizar condiciones de vida favorables para la biota, por ejemplo, mediante desnitrificación, removilización / remineralización de fósforo, etc.

	División	Grupo	Clase	Tipo de clase	Ejemplos
			Estado químico de las aguas saladas		Mantenimiento / amortiguación de la composición química de la columna de agua de mar y los sedimentos para garantizar condiciones de vida favorables para la biota, por ejemplo, mediante desnitrificación, removilización / remineralización del fósforo, etc.
		Composición atmosférica y regulación climática	Regulación climática global mediante la reducción de las concentraciones de gases de efecto invernadero	Por cantidad, concentración o parámetro climático	Regulación del clima mundial mediante el secuestro de gases de efecto invernadero/carbono por los ecosistemas terrestres, las columnas de agua y los sedimentos y su biota; transporte de carbono a los océanos (DOC), etc.
			* Regulación climática micro y regional		Modificación de la temperatura, la humedad y campos de viento; mantenimiento del clima rural y urbano y de la calidad del aire y de los patrones regionales de precipitación/temperatura

Fuente: Adaptado de la Clasificación Internacional Común de Informe de Servicios Ecosistémicos (CICES Versión. 4.3) <https://cices.eu>.

***Nota: Línea de generación de conocimiento de esta investigación.**

Cuadro 7. Cultural – Interacciones físicas e intelectuales con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos (entornos ambientales) de los Servicios Ecosistémicos.

	División	Grupo	Clase	Tipo de clase	Ejemplos
Cultural	Interacciones físicas e intelectuales con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos (entornos ambientales)	Interacciones físicas y experienciales	Uso experiencial de plantas, animales y paisajes terrestres / marinos en diferentes entornos ambientales	Por visitas/datos de uso, plantas, animales, tipo de ecosistema	Observación in situ de ballenas y aves, snorkel, buceo, etc.
			Uso físico de paisajes terrestres y marinos en diferentes entornos ambientales		Senderismo, senderismo, escalada, paseos en bote, pesca recreativa (pesca con caña) y caza de recreo.
		Interacciones intelectuales y representativas	Científico	Por uso/citación, plantas, animales, tipo de ecosistema	Tema para la investigación tanto en el lugar como a través de otros medios.
			Educativo		Materia de la educación tanto en el lugar como a través de otros medios.
			Patrimonio, cultural		Registros históricos, patrimonio cultural, por ejemplo, conservados en cuerpos de agua y suelos.
			Diversión		Visualización /experiencia ex-situ del mundo natural a través de diferentes medios.
			Estético		Sentido del lugar, representaciones artísticas de la naturaleza.

Fuente: Adaptado de la Clasificación Internacional Común de Informe de Servicios Ecosistémicos (CICES Versión. 4.3) <https://cices.eu>.

Cuadro 8. Cultural – Interacciones espirituales, simbólicas y de otro tipo con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos (entornos ambientales) de los Servicios Ecosistémicos.

	División	Grupo	Clase	Tipo de clase	Ejemplos
Cultural	Interacciones espirituales, simbólicas y de otro tipo con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos (entornos)	Espiritual y/o emblemático	Simbólico	Por uso, plantas, animales, tipo de ecosistema	Plantas y animales emblemáticos, por ejemplo, símbolos nacionales como el águila americana, la rosa británica, el narciso galés.
			Sagrado y/o religioso		Identidad espiritual y ritual, por ejemplo, "camino de sueños" de australianos nativos, lugares sagrados; plantas y animales sagrados y sus partes.
		Otros productos culturales	Existencia	Por plantas, animales, tipo de característica/ecosistema o componente	Disfrute proporcionado por especies silvestres, áreas silvestres, ecosistemas, paisajes terrestres / marinos.
			Legado		Voluntad de preservar plantas, animales, ecosistemas, paisajes terrestres / marinos para la experiencia y el uso de las generaciones futuras; perspectiva o creencia moral / ética.

Fuente: Adaptado de la Clasificación Internacional Común de Informe de Servicios Ecosistémicos (CICES Versión. 4.3) <https://cices.eu>.

Perturbaciones

Las perturbaciones son un conjunto de eventos discretos en el tiempo que alteran el ecosistema, la comunidad o la estructura de la población y cambia los recursos y el entorno físico cuyo cambio es parte integral de la dinámica del paisaje (Turner *et al.*, 1993; Battissi *et al.*, 2016). Las perturbaciones que influyen en los ecosistemas se pueden dividir en dos categorías: 1. Naturales (huracanes, sequías, inundaciones, incendios, vientos, deslizamientos de tierra y enfermedades); y 2. Antropogénicas (deforestación, fragmentación, explotación de recursos, intervenciones de manejo, ocupación del suelo y contaminación) (Figura 1) (Manson *et al.*, 2009; Bonan *et al.*, 2014).

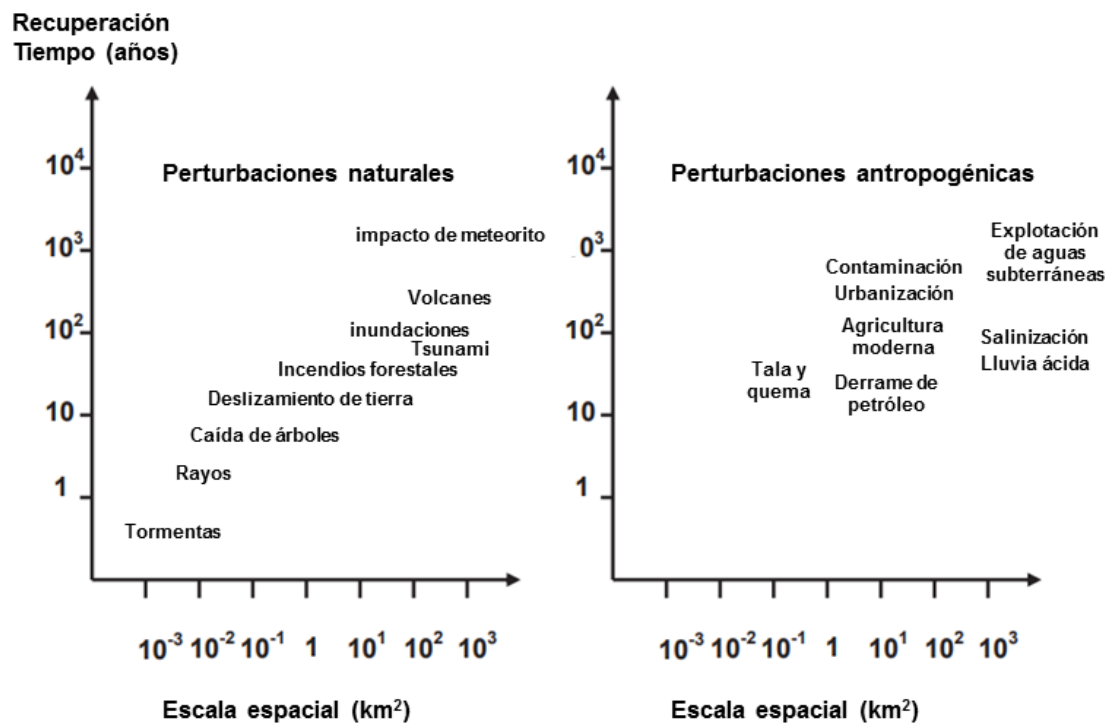


Figura 1. Características espaciales y temporales de algunas perturbaciones naturales y antropogénicas. Tomada y modificada de (Nielsen *et al.*, 2020).

Actualmente la transformación de los ecosistemas por la acción humana puede imitar, modificar o amplificar los efectos de eventos naturales o alterar regímenes históricos de perturbación en un ecosistema particular, aumentar su vulnerabilidad o introducir nuevos tipos de perturbación e impide que la composición de la vegetación alcance cualquier línea de estado de 'clímax' o 'equilibrio' (Pielke *et al.*, 2003; Manson *et al.*, 2009; Winter *et al.*, 2018).

Los ecosistemas han estado sujetos a regímenes de perturbación que se pueden caracterizar por distintos atributos, como su variabilidad interanual (o interdecadal), estacionalidad y tiempo, frecuencia, magnitud de eventos individuales y distribución espacial (Manson *et al.*, 2009; Harms *et al.*, 2018). Estas particularidades son importantes para dar forma no solo a la composición, estructura y función de la comunidad, sino que también sirven como fuerzas selectivas en la evolución de las estrategias de la historia de vida, especialmente en ecosistemas propensos a perturbaciones (Dell *et al.*, 2019).

Asimismo, las perturbaciones inducen la dinámica en los ecosistemas y dan lugar al patrón de vegetación del sitio, pero también existen umbrales más allá de los cuales pueden suceder cambios abruptos inesperados, tanto cuantitativos como cualitativos, en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas que los hacen más vulnerables a perturbaciones futuras o que incluso llevan al reemplazo de un tipo de ecosistema por otro (Bonan, 2015; Nielsen *et al.*, 2020). La perturbación está íntimamente relacionada con la sucesión, que se define de manera más simple como el cambio en las propiedades del ecosistema en un sitio después de la perturbación (Harms *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2020).

Cuando una perturbación natural elimina la vegetación existente comienza el proceso de sucesión (Figura 2) de acuerdo a los siguientes estados:

1. **Inicial:** una entrada de material con potencial de desarrollo dependerá de la información genética disponible en el banco de semillas o por entradas laterales. Debido a una conectividad menor entre los elementos, la autorregulación es baja y la suma de oportunidades potenciales de desarrollo (incertidumbre de desarrollo) es alta. El sistema proporciona una muy alta adaptabilidad y flexibilidad.
2. **Etapa pionera:** se caracteriza por un aumento elevado y rápido de la biomasa, correlacionado con un aumento del número y tamaño de los componentes del ecosistema. Para proporcionar el creciente número de participantes, el flujo de energía aumenta, así como la degradación de la energía que es necesaria para el mantenimiento de los componentes. La conectividad es baja y, por lo tanto, las entradas externas pueden modificar el sistema fácilmente: la adaptabilidad es alta.
3. **Sucesión intermedia:** después de que se haya establecido una primera estructura, los actores exitosos comienzan a canalizar energía y materia hacia su propia fisiología.

Debido a la adaptación mutua de la comunidad ganadora, la conectividad del sistema aumenta mediante interrelaciones estructurales, energéticas y materiales adicionales y mecanismos cíclicos. Las especies individuales se vuelven cada vez más dependientes entre sí, disminuye la incertidumbre y crece el papel de los procesos de autorregulación, reforzando la estructura predominante. Se reduce la adaptabilidad.

4. **Crecimiento de información.** En esta etapa tiene lugar un desarrollo cualitativo en el comportamiento del sistema, pasando de patrones explotadores a patrones más conservadores con altas eficiencias de procesamiento de energía y materia. Las especies que se adaptan fácilmente a la variabilidad externa han sido reemplazadas por las especies estrategas que controlan la variabilidad, la estructura de nicho se mejora ampliamente y la pérdida se reduce. El contenido de información del sistema aumenta continuamente. La mayor parte de la energía capturada se utiliza para el mantenimiento del sistema; así, sólo queda un pequeño excedente energético que puede ser utilizado para procesos de adaptación. Las sensibilidades frente a las perturbaciones externas se han vuelto altas, mientras que las capacidades de amortiguación del sistema son mucho menores en comparación con las etapas anteriores del desarrollo. Estos elementos dan como resultado un aumento de la vulnerabilidad del sistema y una disminución de la resiliencia. La adaptabilidad ha alcanzado valores mínimos.
5. **Liberación.** Debido a la “fragilidad” de las etapas maduras, su estructura puede romperse muy rápidamente debido a cambios menores en las condiciones exteriores. Se liberan los recursos acumulados, se rompen los mecanismos internos de control y organización, y las retroalimentaciones positivas provocan la decadencia del sistema maduro. Solo hay interacciones extremadamente débiles entre los componentes del sistema, los nutrientes se pierden y las redes cíclicas se desconectan. Se han superado la adaptabilidad y la resiliencia.
6. **Reorganización.** Durante este breve período, los recursos estructurales y funcionales pueden organizarse para favorecer nuevas direcciones, pueden surgir nuevas especies y tener éxito y, a pesar de la memoria heredada (p. ej., banco de semillas del antiguo sistema e influencias vecinas), impredecible. los rasgos de desarrollo son posibles.

Hay controles débiles, y la innovación, la novedad y el cambio pueden conducir a una adaptación optimizada en un nivel superior.

7. **Restablecimiento.** Comienza una nueva sucesión de ecosistemas (Odum *et al.*, 2005; Bonan, 2015; Nielsen *et al.*, 2020).

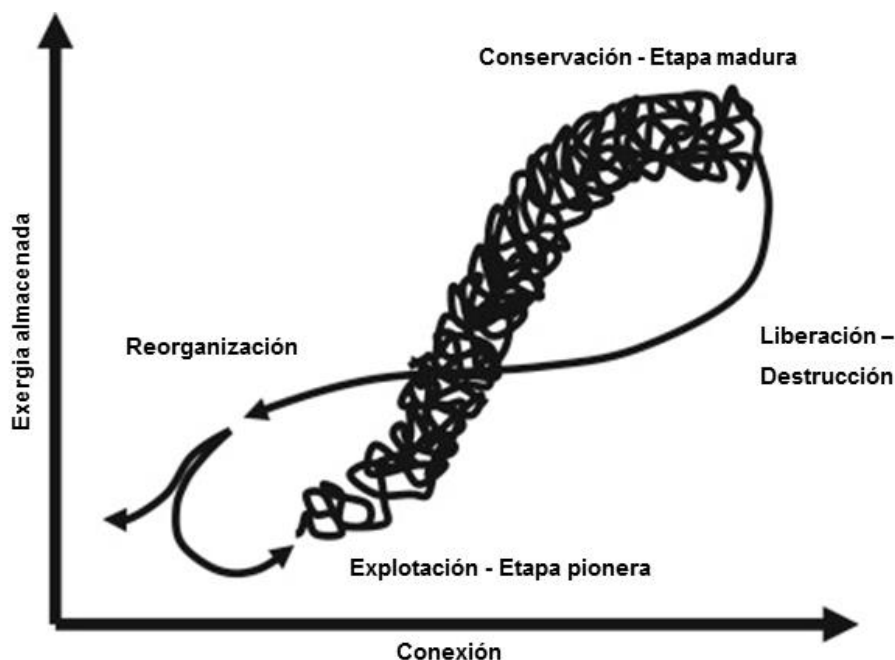


Figura 2. Sucesión de ecosistemas en función de elementos estructurales y funcionales. Fuente: Nielsen *et al.*, 2020.

Deforestación

La deforestación se define como la conversión de bosques a otro uso de la tierra independiente si es inducido o no, o la reducción a largo plazo de las copas de los árboles por debajo del 10 % y se puede identificar con relativa facilidad (Ellis *et al.*, 2020; FAO *et al.*, 2021). Los bosques abarcan alrededor de 4060 millones de ha mundialmente, que corresponden aproximadamente al 30 % de la extensión total de la tierra y se utilizan principalmente para la producción de biomasa maderera. Sólo una proporción decreciente de los bosques naturales del mundo se mantienen en pie, sin fragmentar o sin alterar (FAO, 2021; Felton *et al.*, 2022).

En el periodo 1990 al 2020, el mundo perdió cerca de 1780 millones de hectáreas de bosque a nivel mundial aún y cuando la pérdida neta de bosques se redujo en años recientes. Para México, las tasas de deforestación oscilan entre quinientas mil y seiscientas

mil hectáreas anuales. De 1976 al 2000, el país perdió 2 millones de hectáreas de bosques templados, 6 millones de bosques tropicales y 4.5 millones de matorrales desérticos. En el periodo 2001-2020, alrededor de 654 mil hectáreas de bosque fueron afectadas (Figura 3). Al 2010, México contaba con alrededor de 48.9 millones de hectáreas naturales de bosques distribuyéndose sobre el 26 % de su territorio, pero se estima que para el año 2020 se perdieron 295 mil hectáreas que fueron sustituidas por coberturas de tipo antrópico como pastizales, zonas agrícolas y asentamientos humanos (Bravo-Peña *et al.*, 2010; Hansen *et al.*, 2018; FAO, 2021).

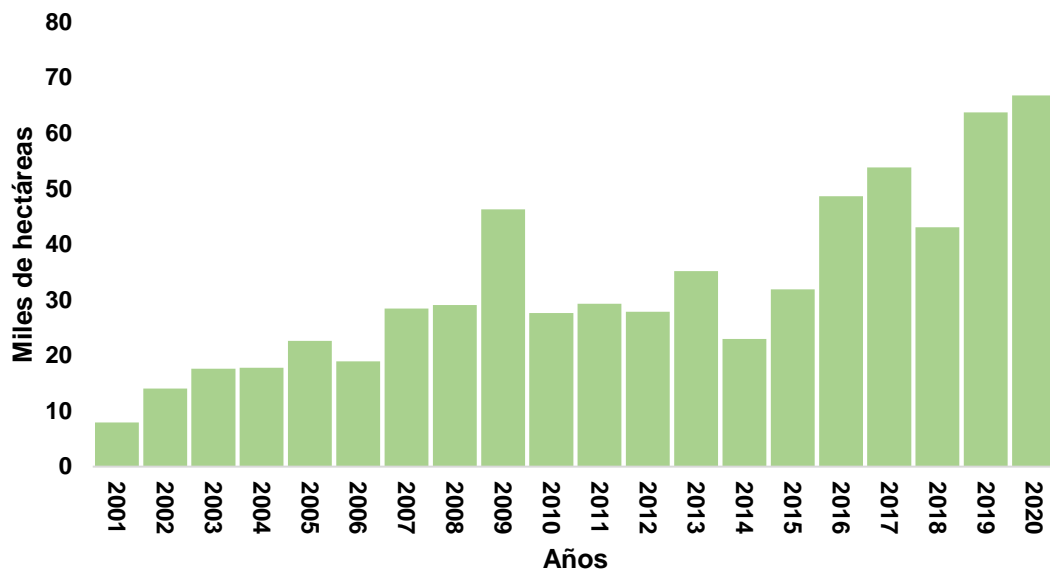


Figura 3. Deforestación de bosque primario en México. Fuente: University of Maryland and World Resources Institute. "Global Primary Forest Loss".

La deforestación (como resultado de los cambios en el uso y la gestión del suelo) se debe principalmente al aumento de las áreas de cultivo o sellado del suelo para áreas urbanas e infraestructuras. Se estima que cerca del 58 % de la deforestación es causada por la agricultura, siendo el principal factor que determina la geografía de la dinámica del uso de la tierra (Chapagain *et al.*, 2013; Escolano *et al.*, 2018; Bonilla-Moheno *et al.*, 2020; Ochoa-Noriega *et al.*, 2021).

Usos de suelo y vegetación

El cambio de uso de suelo es un proceso en el cual por aspectos naturales y por actividades humanas, transforman los ecosistemas en el tiempo y el espacio (Paul *et al.*, 2017; Cai *et al.*, 2019; Tewabe *et al.*, 2020). Actualmente, el uso humano de la tierra ha moldeado y alterado la mayoría de los paisajes de nuestro planeta influenciados principalmente por el crecimiento de la población en el sistema, el crecimiento económico y factores físicos que incluyen la topografía, la condición de la pendiente, el tipo de suelo y el clima (Winter *et al.*, 2018; Tewabe *et al.*, 2020).

Las fuerzas impulsoras del cambio de uso de suelo generalmente se dividen en tres grupos: impulsores socioeconómicos, impulsores biofísicos y variables asociadas de gestión de la tierra (Shrestha *et al.*, 2017; Elobeid *et al.*, 2019). Generalmente, las de mayor peso son las variables biofísicas y socioeconómicas, pero el impacto humano ha sido identificado como el principal impulsor de los cambios en los ecosistemas y los servicios asociados (Birkhofer *et al.*, 2015; Shrestha *et al.*, 2017).

Los cambios de uso de la tierra son un proceso histórico que se relaciona con la forma en que las personas usan la tierra y modifican la disponibilidad de recursos, vegetación, suelo y agua (Tewabe *et al.*, 2020). Por ello, las prácticas actuales y futuras de uso de la tierra deben evaluarse en relación con las compensaciones entre la producción de alimentos y la provisión de biodiversidad y otros servicios ambientales (Winter *et al.*, 2018). Por ejemplo, el cambio y la intensificación del uso de la tierra se encuentran entre las presiones más generalizadas que enfrenta la biodiversidad terrestre en todo el mundo. Solo 39% de la tierra nunca se ha convertido para uso humano; alrededor de 265 000 km² de paisajes inalterados se pierden cada año, mientras que alrededor de 290 000 km² se abandonan y vuelven a convertirse en vegetación secundaria (De palma *et al.*, 2018).

Asimismo, el cambio de uso de la tierra es un problema ambiental importante en el mundo. Por ello, el seguimiento y la gestión de los cambios en el uso de la tierra que se producen a diferentes niveles espaciales y temporales son información importantísima, pero requieren información precisa (Nehzak *et al.*, 2022). En consecuencia, la información sobre los efectos del cambio en el uso de la tierra en las unidades proveedoras de servicios y los servicios ecosistémicos asociados es cada vez más demandada por los encargados

de la formulación de políticas y administradores para promover el uso sostenible y la provisión continua de servicios (Birkhofer *et al.*, 2015). En todo el mundo, el uso intensivo de la tierra se ha centrado únicamente en la producción, pero a su vez se ha convertido en un importante impulsor del cambio global que provoca la disminución de la biodiversidad, el funcionamiento de los ecosistemas y múltiples servicios ecosistémicos (SE) en los ecosistemas agrícolas (Winter *et al.*, 2018).

Políticas públicas en México

Diversas políticas públicas tienen efectos ambientales considerables en los ecosistemas del mundo, incluso provocando un deterioro ambiental (Brenner, 2018). En las últimas décadas, México ha promulgado políticas de ordenamiento territorial, las cuales han tenido impactos en todo el país, pero dependen de los determinantes espaciales y del contexto local. Por ejemplo, algunas regiones la protección o el abandono de la tierra facilita la recuperación de bosques secundarios, mientras que, en otras, la intensificación agrícola y las políticas de uso de la tierra han fomentado la pérdida de bosques o el cambio de pastos a cultivos (Bonilla-Moheno *et al.*, 2020).

Hoy en día, México es una potencia agrícola en términos de superficie cultivada, producción y volumen de exportaciones y es uno de los principales proveedores de alimentos del mundo con una superficie de 198 millones de hectáreas, de las cuales aproximadamente 73 % se utilizan para actividades agrícolas (Ochoa-Noriega *et al.*, 2021).

Por años se ha utilizado diversas políticas como estrategia para promover el desarrollo económico del país en el sector agropecuario eliminando la cobertura arbórea para el establecimiento de actividades agrícolas, agropecuarias y áreas urbanas, las cuales han afectado profundamente los ecosistemas. Por ejemplo: El Programa Nacional de Desmonte (PRONADE), el Programa de Apoyo Directo al Campo (PROCAMPO), Programa Ganadero (PROGAN), Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), Plan Nacional Agrícola 2017-2030 y Sembrando Vida (Bravo-Peña *et al.* 2010; García-Jiménez 2017; Ávalos *et al.*, 2020; Ochoa-Noriega *et al.*, 2021).

Climatología Ecológica

Interacción Biósfera-Atmósfera

En el sistema tierra, alterar cualquier interacción entre la atmósfera, la hidrósfera, la criósfera, la litósfera y la biósfera tiene efectos en cascada en otros sistemas (Chapin *et al.*, 2011; Bonan, 2015; Arendt *et al.*, 2021). En la actualidad las actividades humanas en el Sistema Tierra han afectado de manera notable a la biósfera que ha hecho urgente la necesidad de comprender cómo los procesos de los ecosistemas terrestres afectan a la atmósfera y los intercambios de agua y energía (Chapin *et al.*, 2011; Hungate *et al.*, 2015; Ludwig *et al.*, 2017). Para el caso de interacción Biósfera-Atmósfera, se refiere a los intercambios de calor, humedad, gases traza, aerosoles y cantidad de movimiento entre las superficies terrestres y el aire. Estas retroalimentaciones representan un sistema acoplado dinámico que se esperaría que evolucionara de manera diferente entre el ecosistema y la atmósfera como resultado de la modificación de los parámetros radiativos como los no radiativos de la superficie (longitud de rugosidad, albedo y LAI) que están controlados por los detalles de la vegetación que a nivel regional pueden ser importantes (Pielke *et al.*, 2003; Menon *et al.*, 2007; Hungate *et al.*, 2015; Green *et al.*, 2017).

Los ecosistemas terrestres también pueden afectar el clima, principalmente por que la alteración de la cubierta vegetal modifica el albedo, la rugosidad y la humedad del suelo (Foley *et al.*, 2003; Menon *et al.*, 2007; Tewabe *et al.*, 2020). En períodos de tiempo de años, la composición de las especies y las características del suelo, incluida la renovación de nutrientes, pueden cambiar en respuesta a cambios atmosféricos a largo plazo, a través de la sucesión natural de la vegetación y perturbaciones humanas. Se esperaría que estos cambios en el ecosistema terrestre retroalimenten la estructura atmosférica y afecten significativamente la trayectoria del cambio climático (Figura 4) (Pielke *et al.*, 2003; Bonan, 2015; Green *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2021). La deforestación provocaría una alteración en la temperatura de la superficie, en la precipitación anual y la evapotranspiración debido a los cambios en el equilibrio de energía superficial y agua al perturbar el albedo, la rugosidad y la humedad de suelo (Foley, 2003; Menon *et al.*, 2007; Bonan, 2015). En las interacciones de la Biósfera-Atmósfera no hay resultados lineales,

mientras unas regiones se vuelven más cálidas otras son más frías, algunas se vuelven más húmedas y otras más secas (Foley, 2003).

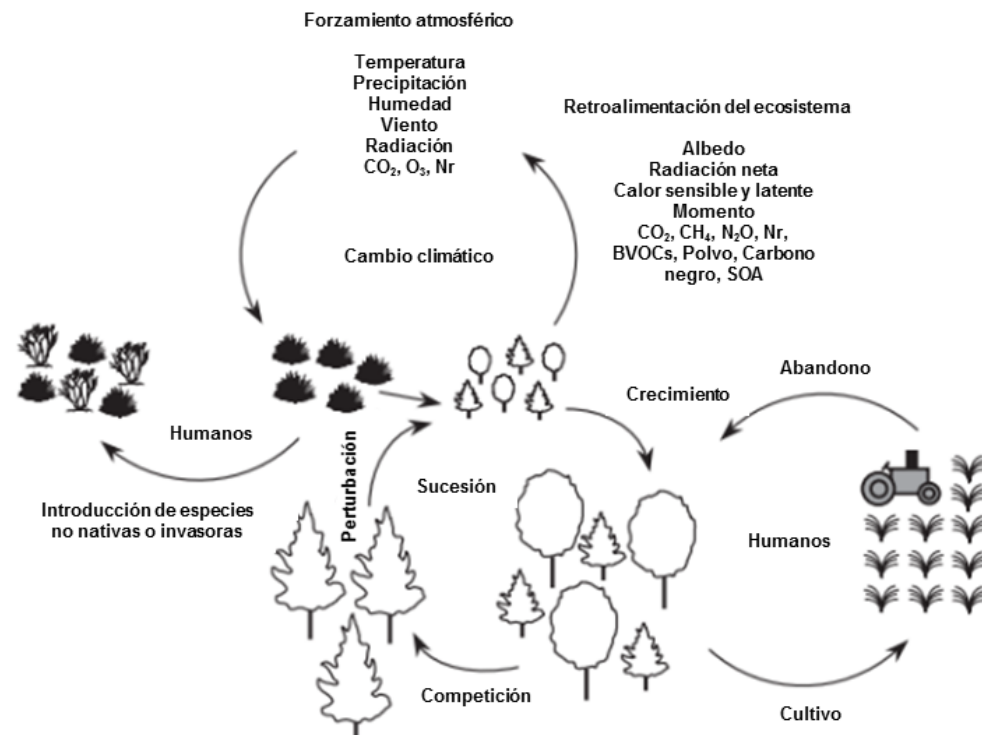


Figura 4. Dinámica clima-vegetación. Fuente: Bonan, 2015.

Por ejemplo, el remplazar el bosque con vegetación con menos follaje afecta las temperaturas ya que aumenta el albedo lo cual enfría la superficie a reducir la cantidad de radiación solar que puede absorber. Al mismo tiempo se reduce la rugosidad de la superficie, el área foliar y la profundidad de las raíces provocando una disminución en la evapotranspiración, lo que a su vez aumenta la temperatura. Finalmente, el efecto de enfriamiento del albedo es compensado y, a menudo superado por la reducción del enfriamiento por evaporación (Foley, 2003; Jach *et al.*, 2020).

Asimismo, se modifican las precipitaciones por la reducción de la radiación solar absorbida y el aumento de la temperatura superficial provocando una disminución del calentamiento radiativo neto de la superficie terrestre, dejando menos energía para la circulación atmosférica y menos precipitaciones en la región. Finalmente, la reducción de la rugosidad de la superficie, el área foliar y la profundidad de las raíces limita la cantidad

de agua que se puede reciclar a la atmósfera localmente a través de la evapotranspiración (Figura 5) (Foley, 2003).

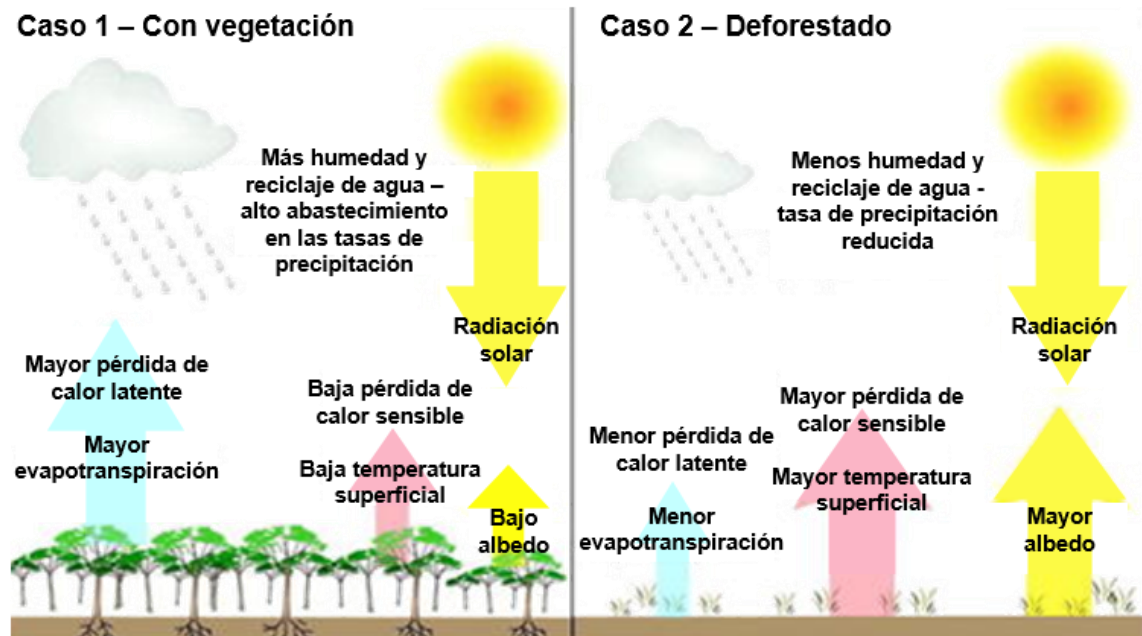


Figura 5. Efectos climáticos de la deforestación. Fuente: Foley, 2003.

Clima

El clima comprende las más amplias escalas de tiempo que operan en la atmósfera en un lugar determinado, el cual describe el clima promedio, o el estado a largo plazo de la atmósfera, durante períodos de muchos años por el efecto agregado de los fenómenos meteorológicos y se representa por los valores medios como los extremos (Molloy *et al.*, 2008; Barry *et al.*, 2009; Bonan, 2015; Fletcher *et al.*, 2020).

Asimismo, hay vínculos climáticos entre regiones separadas geográficamente que pueden ocasionar variabilidad climática que pueden provocar desviaciones notables en la climatología a largo plazo (Bonan, 2015; Nigam *et al.*, 2015; Merchant *et al.*, 2019). Por mencionar algunos modos de variabilidad climática se encuentran El Niño-Oscilación del Sur, Oscilación del Atlántico Norte, La Oscilación Ártica, La Oscilación Multidecadal del Atlántico y Oscilación Decadal del Pacífico. encuentran El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es un calentamiento a gran escala de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico tropical oriental (Figura 6), asociado con una circulación

reducida de Walker que debilita los vientos alisios, con lluvias por debajo de lo normal en el Pacífico tropical occidental y lluvias por encima de lo normal a lo largo del ecuador. Los cambios en la temperatura de la superficie del mar tropical y la circulación atmosférica afectan la temperatura y la precipitación en todo el mundo (Bonan, 2015; Philander, 2019).

La Oscilación del Atlántico Norte está asociada con cambios en la fuerza de la baja islandesa y el alta subtropical en el Atlántico Norte durante el invierno. Esto afecta la fuerza de los vientos del oeste en latitudes medias, con consecuencias para la temperatura invernal y las precipitaciones desde el este de América del Norte hasta Europa y Asia.

La Oscilación Ártica (AO, por sus siglas en inglés) se caracteriza por vientos que se mueven en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del Ártico. En su fase positiva, la presión superficial en las regiones polares es más baja de lo normal. Gran parte de los Estados Unidos y el norte de Eurasia experimentan temperaturas superiores a lo normal. Estos vientos se debilitan durante la fase negativa del AO, cuando la presión es más alta de lo normal en las regiones polares. La Circulación Circumpolar más débil permite que las masas de aire frío del Ártico se muevan hacia el sur. Los inviernos son más fríos y tormentosos de lo normal.

La Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) es otro modo de variabilidad que ocurre en el Océano Atlántico Norte. Se caracteriza por un patrón coherente de anomalías en la temperatura de la superficie del mar cálido o frío con un período de varias décadas. El AMO afecta la temperatura y la precipitación sobre América del Norte y Europa.

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) es un evento similar al ENSO pero de larga duración (20 a 30 años) en el Océano Pacífico. Sus fases se caracterizan por anomalías en la temperatura oceánica cálida o fría, y sus efectos en el clima se observan principalmente en el Pacífico Norte y América del Norte (Bonan, 2015). Para México hay fenómenos de gran escala que afectan las condiciones climáticas, entre los que se encuentran: los sistemas frontales de latitudes medias, la actividad convectiva tropical, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el monzón mexicano, las ondas del este o los ciclones tropicales (Magaña *et al.*, 2003).

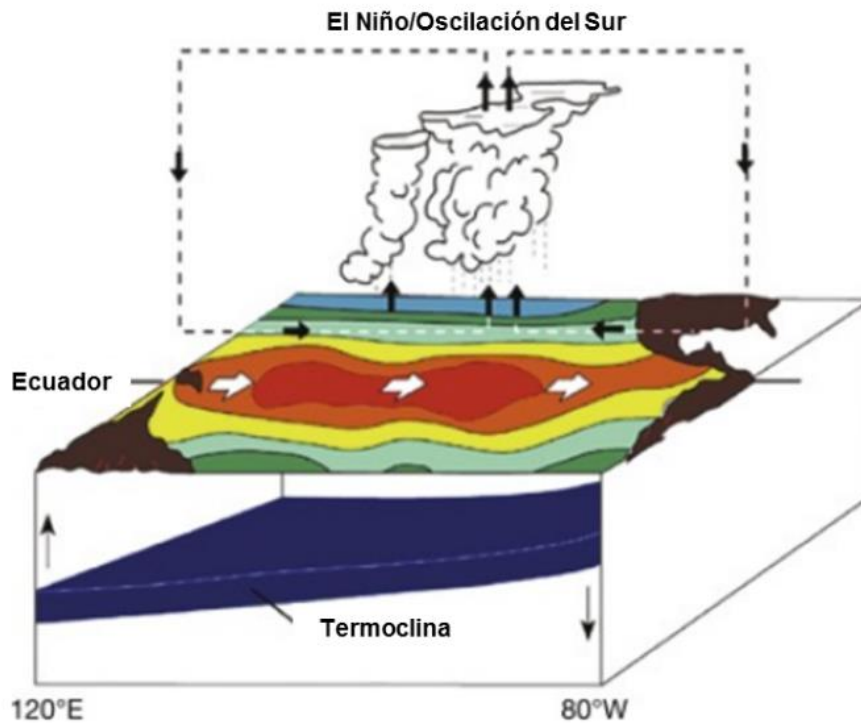


Figura 6. Esquema de las condiciones de El Niño. Fuente: Philander, 2019.

Procesos físicos

Los procesos físicos entre la interacción de la biósfera y la atmósfera están gobernados por la vegetación y otros elementos de la superficie que interfieren con el flujo de aire. Por ejemplo, la humedad y el calor se intercambian cuando la radiación neta (R_n) en la superficie regresa a la atmósfera como calor sensible (H), calor latente (E) o cuando se almacena en el suelo (G). Estas retroalimentaciones se entienden a través del balance de energía superficial:

$$R_n = (S \downarrow - S \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow) = H + E + G$$

Donde $S \downarrow$ y $L \downarrow$ son la radiación solar descendente y la radiación de onda larga de la superficie descendente, respectivamente, y $S \uparrow$ y $L \uparrow$ son los flujos radiativos de onda corta y larga ascendentes desde la superficie. Colectivamente, estos cuatro flujos radiativos comprenden la radiación neta. La unidad típica de medida es el flujo de energía por unidad de área ($J s^{-1} m^{-2}$ o $W m^{-2}$). Entonces, la modificación de la cobertura de la superficie

puede afectar los procesos físicos (balances de energía) al alterar el albedo, la humedad de suelo y la rugosidad.

Un aumento en el albedo de la superficie puede ocurrir con la pérdida de la cubierta vegetal, y esto aumenta la radiación solar reflejada, reduce la absorción de la radiación solar en la superficie y enfría el clima de la superficie. Menos energía regresa a la atmósfera como calor sensible y latente, lo que promueve el calentamiento de la capa límite atmosférica, así como el vapor de agua en la capa límite. Se desarrolla una retroalimentación positiva si estos cambios disminuyen la precipitación porque un suelo más seco aumenta directamente el albedo y reduce aún más la cubierta vegetal (Figura 7 y 8) (Hillel, 2005; Bonan, 2015; Stephens *et al.*, 2015; Burakowski *et al.*, 2018; He *et al.*, 2018; Cohen *et al.*, 2021).

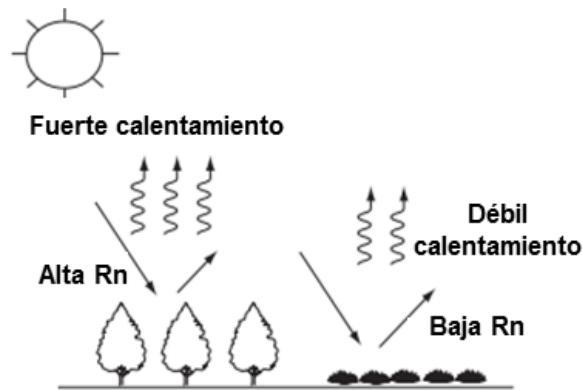


Figura 7. Albedo superficial y radiación neta. Fuente: Bonan, 2015.

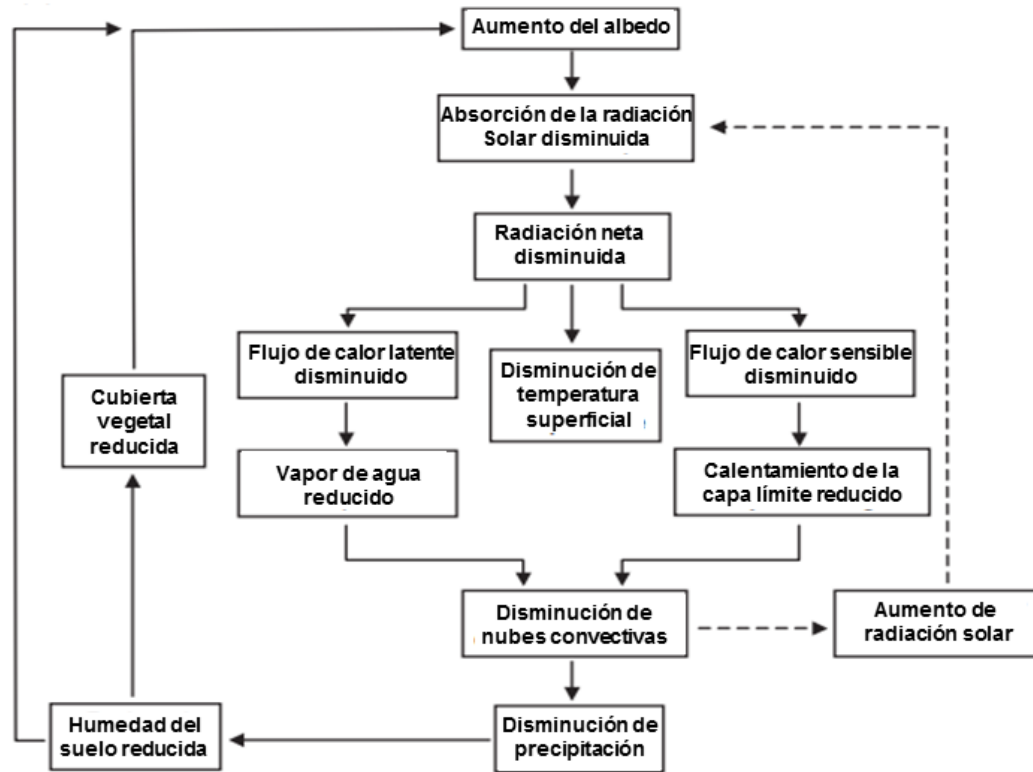


Figura 8. Impactos climáticos superficiales de un aumento en el albedo. Fuente: Bonan, 2015.

La humedad del suelo regula los procesos de la capa límite a través de la partición de la radiación neta en flujos de calor sensible y latente. Una disminución en la cubierta vegetal que reduce el flujo de calor latente, calienta el clima superficial y puede reducir la precipitación. El suelo húmedo puede soportar un alto flujo de calor latente y crear una capa límite atmosférica fría y húmeda, condiciones que se pueden retroalimentar para aumentar la precipitación. Por el contrario, el suelo seco disminuye el flujo de calor latente y amplifica las sequías y las olas de calor (Figura 9 y 10) (Bonan, 2015; Unninayar *et al.*, 2015; Al-Sharafany *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2021; Pandey *et al.*, 2021).

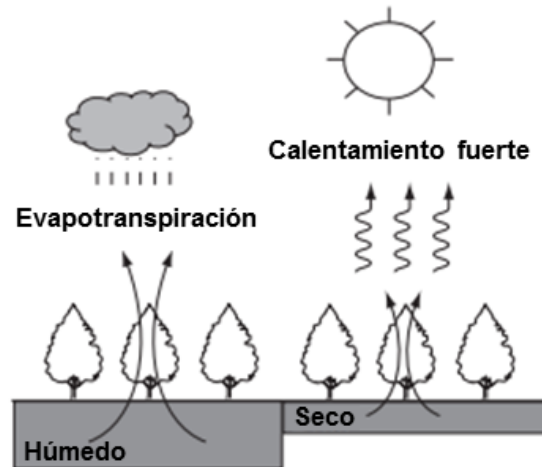


Figura 9. Humedad del suelo, evapotranspiración y precipitación. Tomada de (Bonan, 2015).

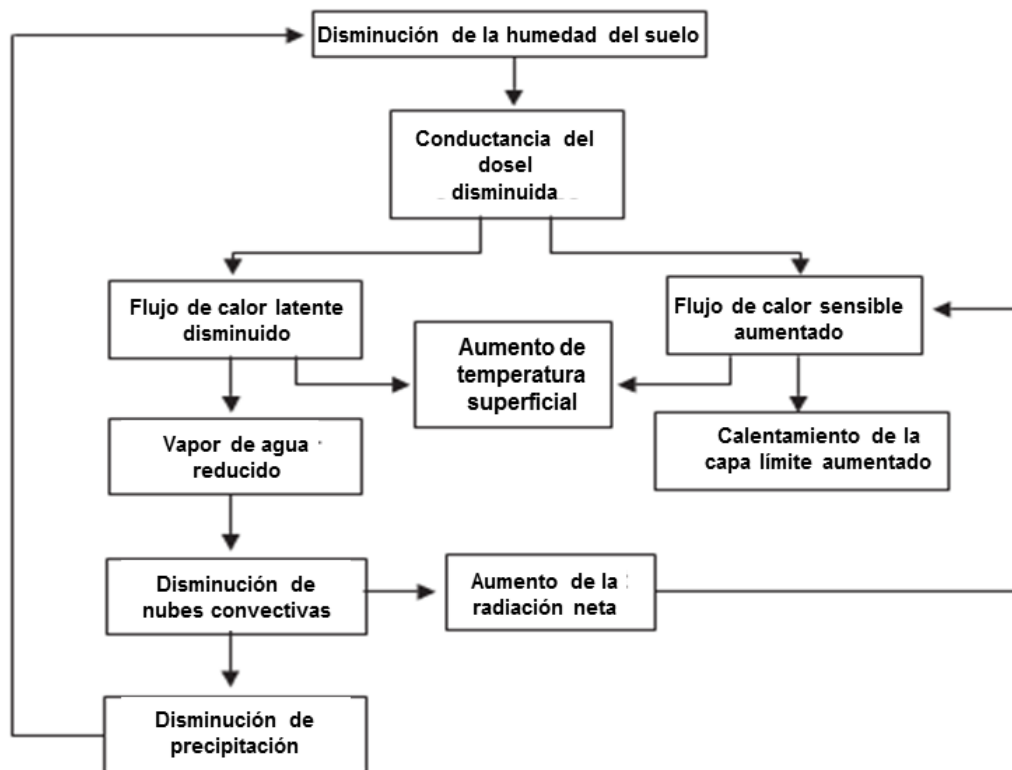


Figura 10. Impactos climáticos superficiales de una disminución en la humedad del suelo. Fuente: Bonan, 2015.

La rugosidad alta de la superficie como los de los bosques, generan más turbulencia y tienen flujos de calor sensible y latente más altos que las superficies baja aspereza. Una disminución en la longitud de la rugosidad reduce la turbulencia y la conductancia

aerodinámica produciendo un aumento en la velocidad del viento y una capa límite atmosférica más cálida, seca y profunda (Figuras 11 y 12) (Pielke *et al.*, 2003; Zobeck *et al.*, 2006; Ellis *et al.*, 2013; Bonan, 2015).

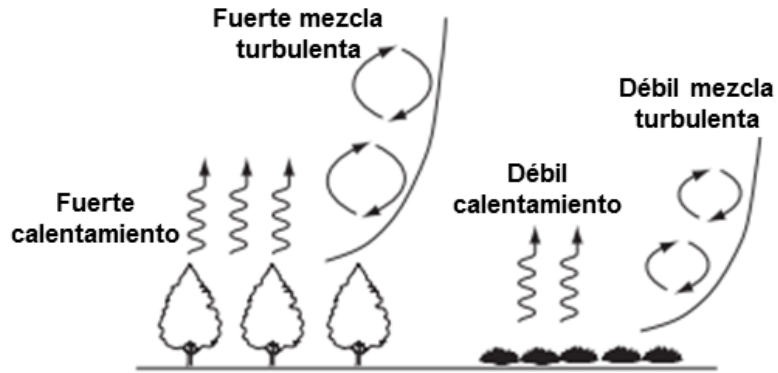


Figura 11. Rugosidad superficial y mezcla turbulenta. Fuente: Bonan, 2015.

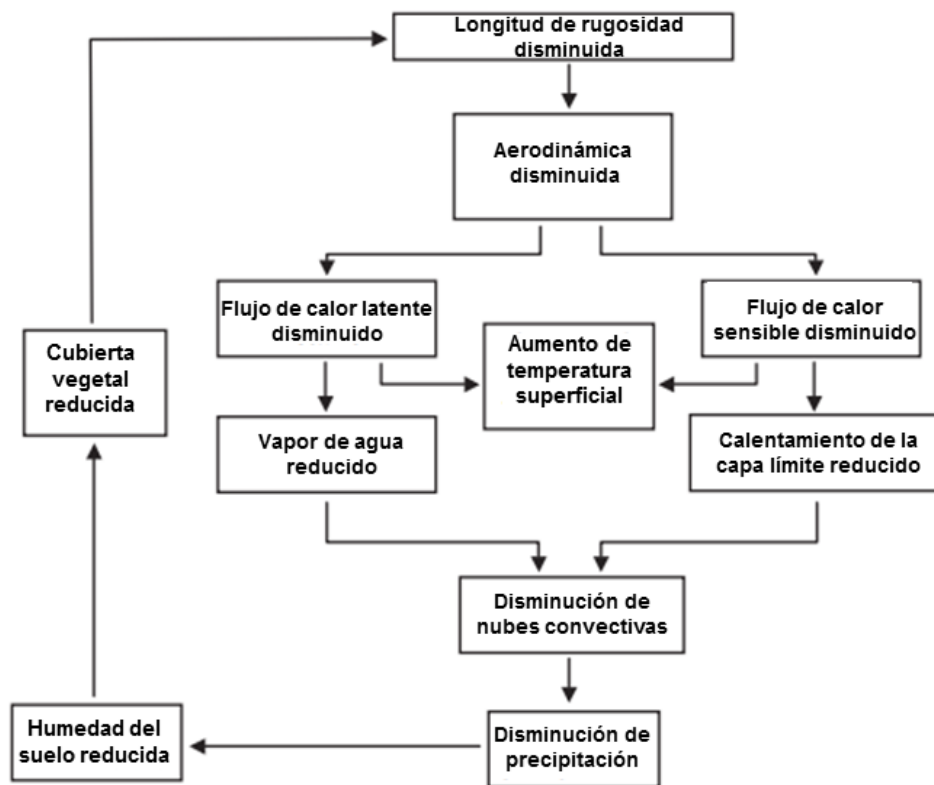


Figura 12. Impactos climáticos de la superficie de una disminución en la rugosidad de la superficie. Fuente: Bonan, 2015.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Esta investigación se enfoca en las relaciones atmósfera biosfera en el estado de San Luis Potosí (México) principalmente en la zona de la Huasteca. El estado de San Luis Potosí (58 municipios) cuenta con una superficie de 6.1 millones de hectáreas (ha) y se enmarca entre las coordenadas geográficas 21° 06' 25" a 24° 35' 18" latitud norte y 102° 26' 39" a 98° 05' 59" longitud oeste (Figura 13).

San Luis Potosí es un estado rico en biodiversidad con variedad de climas y con diferentes niveles de productividad los cuales determinan la intensidad en los usos de suelos de las zonas. Los usos de suelo característicos son matorrales en la zona árida donde la práctica de la ganadería es extensiva, o son bosques en la zona templada en las cuales la práctica de la agricultura de temporal es frecuente, ya sea en zonas planas o de relieve escarpado. Finalmente, en selvas en la parte tropical existe una tendencia para la actividad agrícola y ganadera intensiva (Miranda-Aragón *et al.*, 2013) (Figura 14).

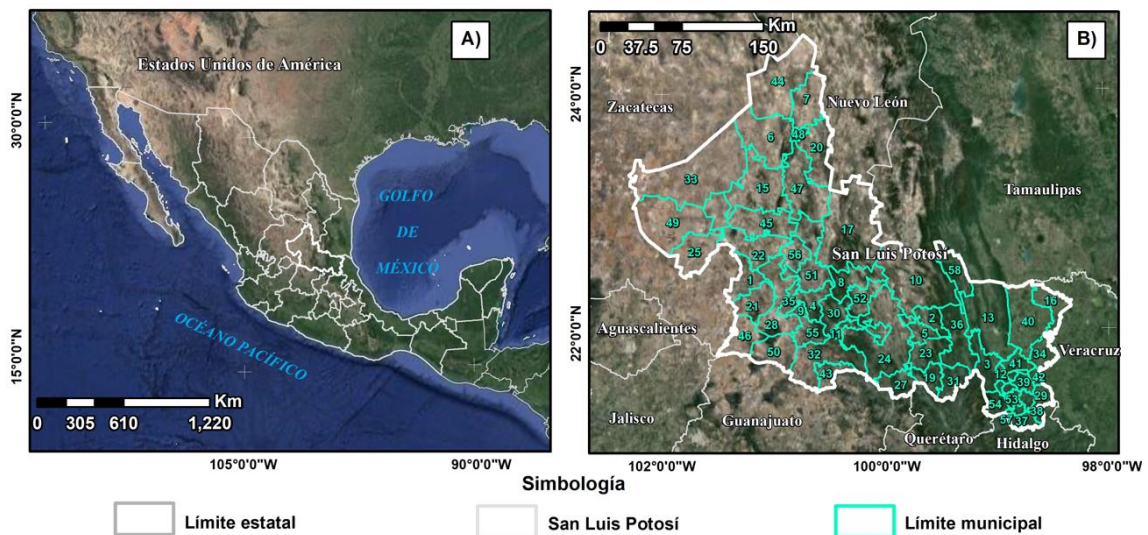


Figura 13. Localización del área de estudio. A) Contexto nacional; B) Nivel estatal.

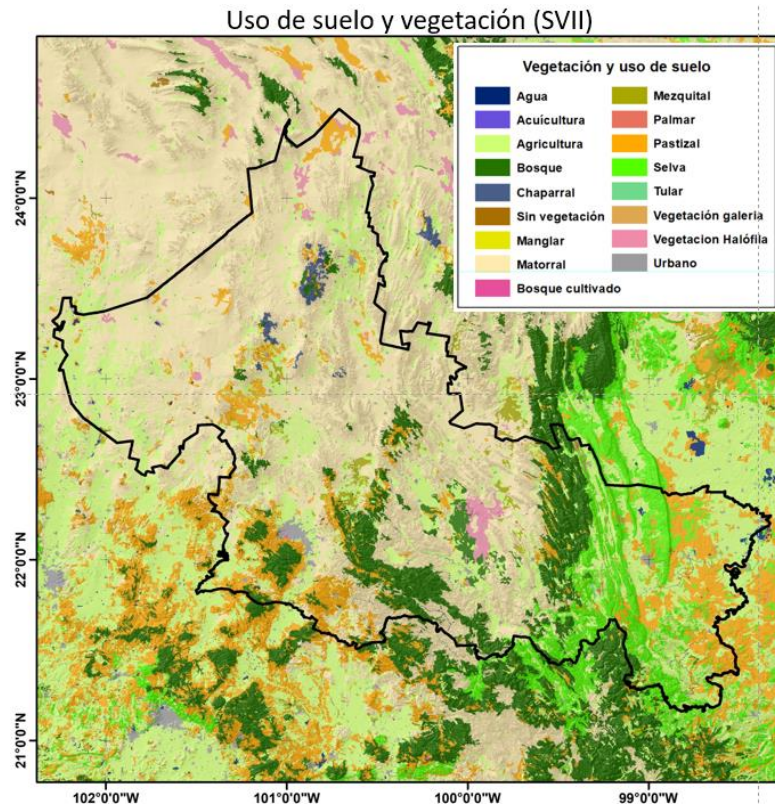


Figura 14. Uso de suelo y vegetación. INEGI Serie VII.

Insumos y análisis de datos

Para entender las interacciones atmósfera biósfera es necesario considerar diversos tipos de información sobre los elementos que indican procesos. Ante el peligro del cambio climático, es de gran importancia tener registro del clima en todo el espacio. Actualmente existen dos herramientas disponibles para la obtención de datos terrestres del clima como lo son las estaciones climatológicas y las estimaciones satelitales. Los datos de las estaciones son muy precisos para registrar a nivel de superficie, pero es solo en las inmediaciones de la estación meteorológica que se representa el tiempo y el clima. Además, las estaciones están distribuidas con distancias promedio de decenas de kilómetros, lo que no permite representar los detalles en escalas menores. Sin embargo, no es necesario representar cada punto de la condición atmosférica para poder representar el clima y sus variaciones, ya que el clima representa una lenta evolución de las condiciones atmosféricas con grandes escalas espaciales (Figura 15).

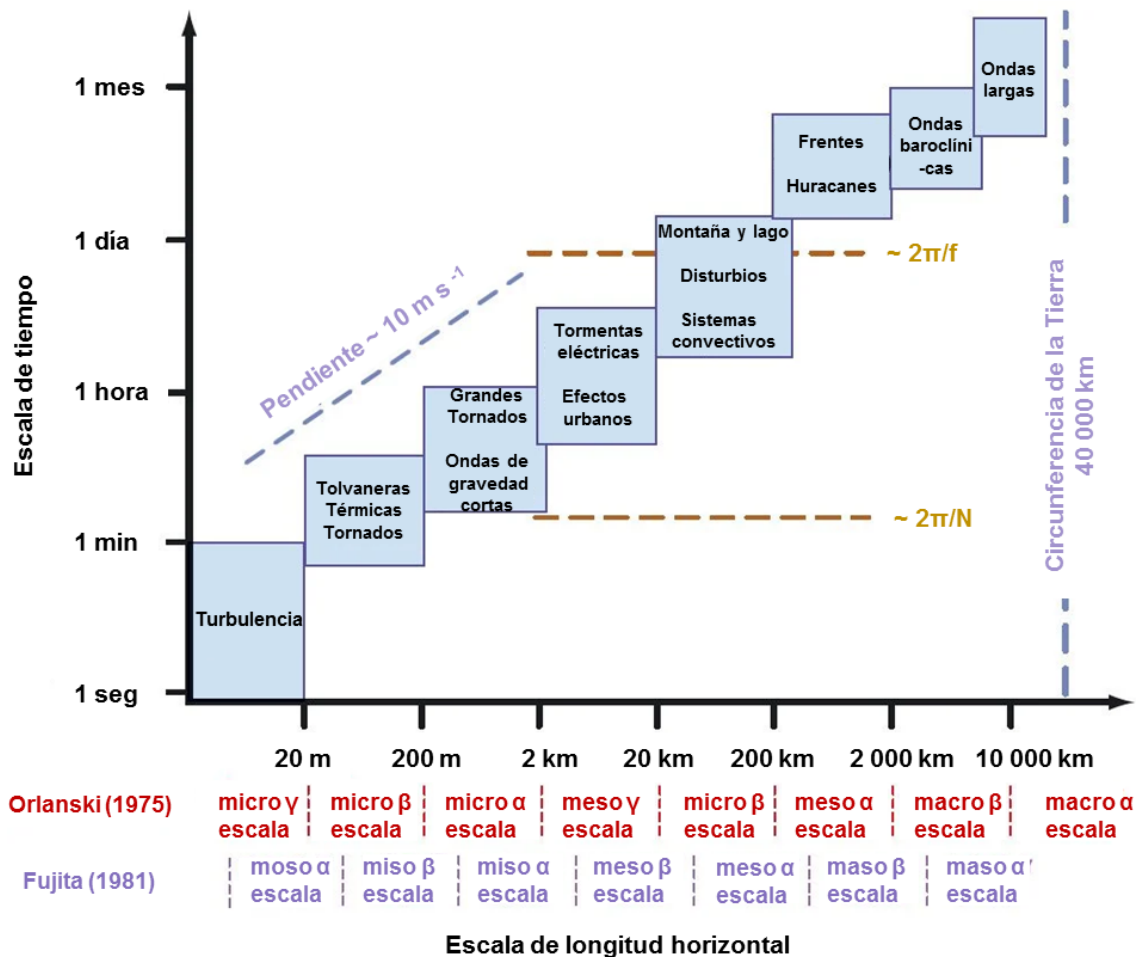


Figura 15. Definiciones de escala y las escalas características de tiempo y longitud horizontal de una variedad de fenómenos atmosféricos. También se indican los esquemas de clasificación de Orlanski (1975) y Fujita (1981). Tomada de (Yuan *et al.*, 2019).

Con la finalidad de representar el clima en México hay alrededor de 3,153 estaciones meteorológicas en operación que esencialmente miden temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación (Comisión Nacional del Agua, 2015). Para este trabajo se seleccionaron 12 estaciones distribuidas en el estado de San Luis Potosí, México (Figura 16).

Estaciones climatológicas

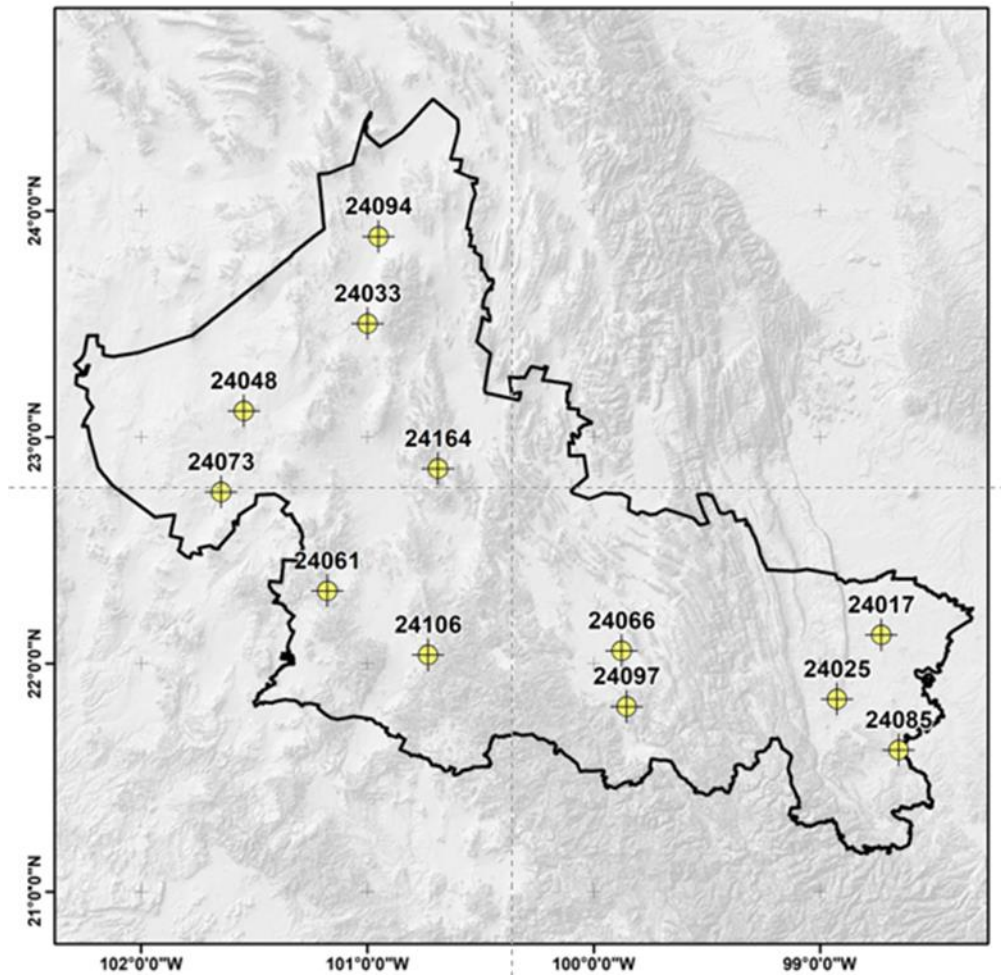


Figura 16. Distribución espacial de estaciones climatológicas.

Por otro lado, las estimaciones satelitales pueden proporcionar información de sitios donde no se tiene registro de estaciones. El análisis objetivo de datos es una técnica que se ha aplicado ampliamente en las investigaciones de la atmósfera para contar con estimaciones de la condición atmosférica en puntos distribuidos uniformemente en un dominio, la cual combina datos de estación y satélite a partir de principios dinámicos que gobiernan el sistema, para proporcionar una estimación del estado del sistema que es mejor que la que podría obtenerse utilizando solo los datos o el modelo (Snyder *et al.*, 2011; Zhang, *et al.*, 2014; Otlé *et al.*, 2016).

La mayoría de los reanálisis atmosféricos cuenta con más de 36 años de registros, lo que los han vuelto útiles para la investigación de modelos climáticos (Potter *et al.*, 2018).

Las fuentes de datos mensuales utilizados en este trabajo son: Modern-Era Retrospective Analysis versión 2 (MERRA-2), Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) y Fifth major global reanalysis (ERA5) (Figuras 17, 18 y 19). MERRA-2 es un reanálisis atmosférico global producido por la Oficina de Asimilación y Modelado Global de la NASA (GMAO) con una resolución espacial de 50 km (0.5 grados x 0.625 grados) y una temporalidad mensual con disponibilidad de 1980 al presente. El CFSR es un producto de reanálisis de tercera generación del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) con una resolución espacial de 28.8 km (0.3 grados x 0.3 grados) y una temporalidad mensual con disponibilidad de 1979 al presente. ERA5 es un conjunto de datos de reanálisis del clima global del Servicio de Cambio Climático Copernicus de ECMWF con una resolución espacial de 24 km (0.25 grados x 0.25 grados) y una temporalidad mensual con disponibilidad de 1979 al presente. Para describir patrones generales de temperatura en superficie y precipitación se utilizaron los reanálisis Merra-2 y CFSR. Para mostrar los procesos físicos con detalle se usaron las variables de humedad específica, evaporación, precipitación, temperatura de superficie, velocidad de viento y flujo de calor sensible y latente hacia la superficie.

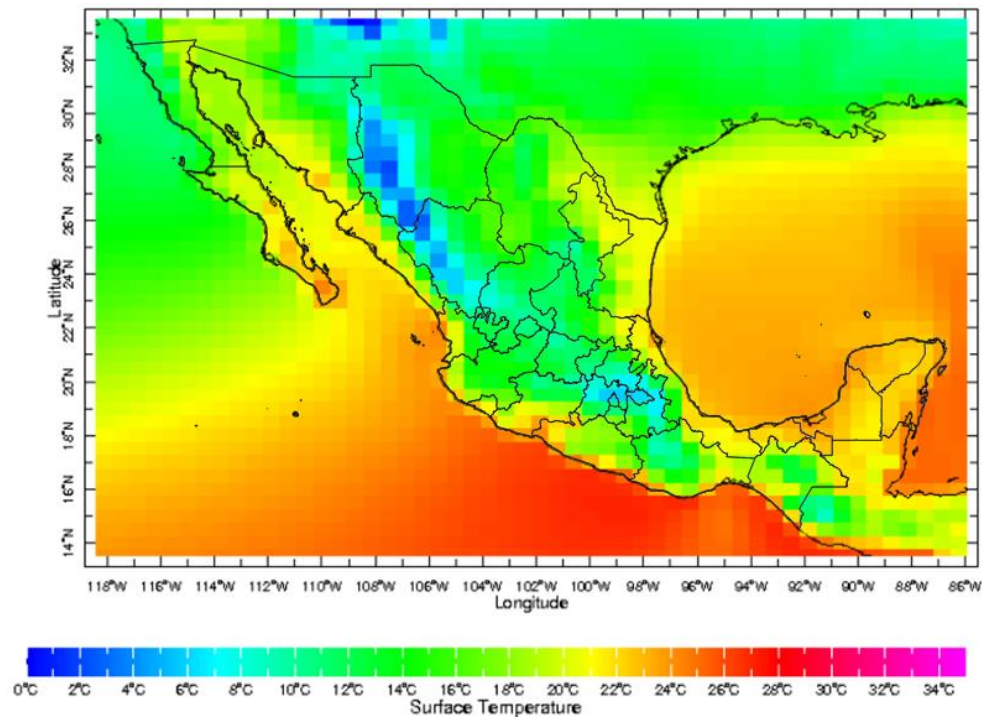


Figura 17. Temperatura de superficie anual (°C), 1980-2019. MERRA-2.

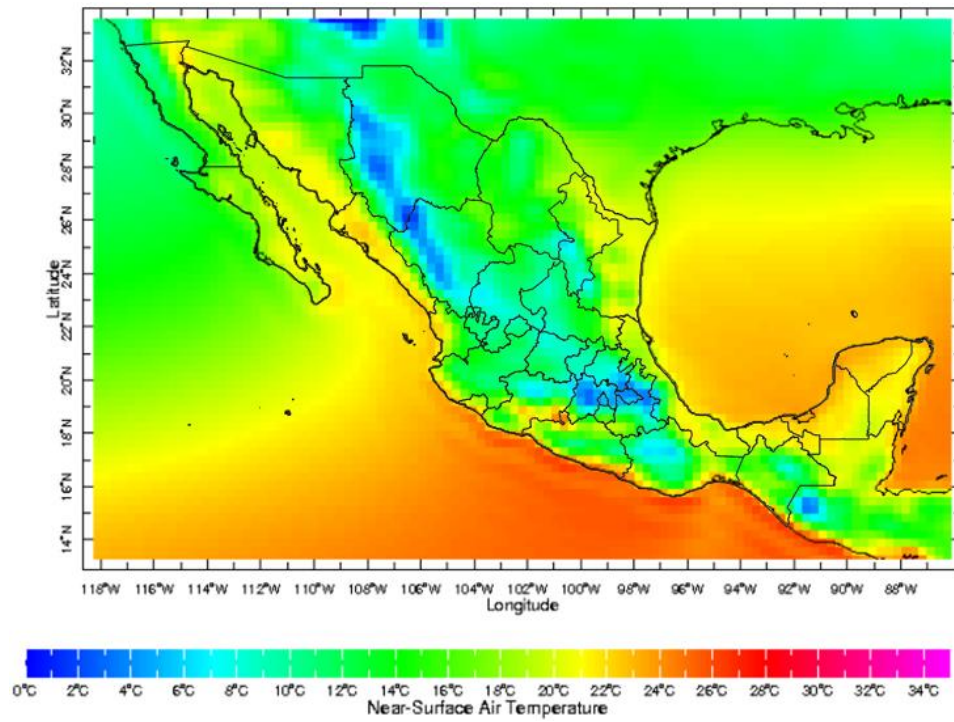


Figura 18. Temperatura cerca de superficie (2m) anual (°C),1980-2019. CFSR.

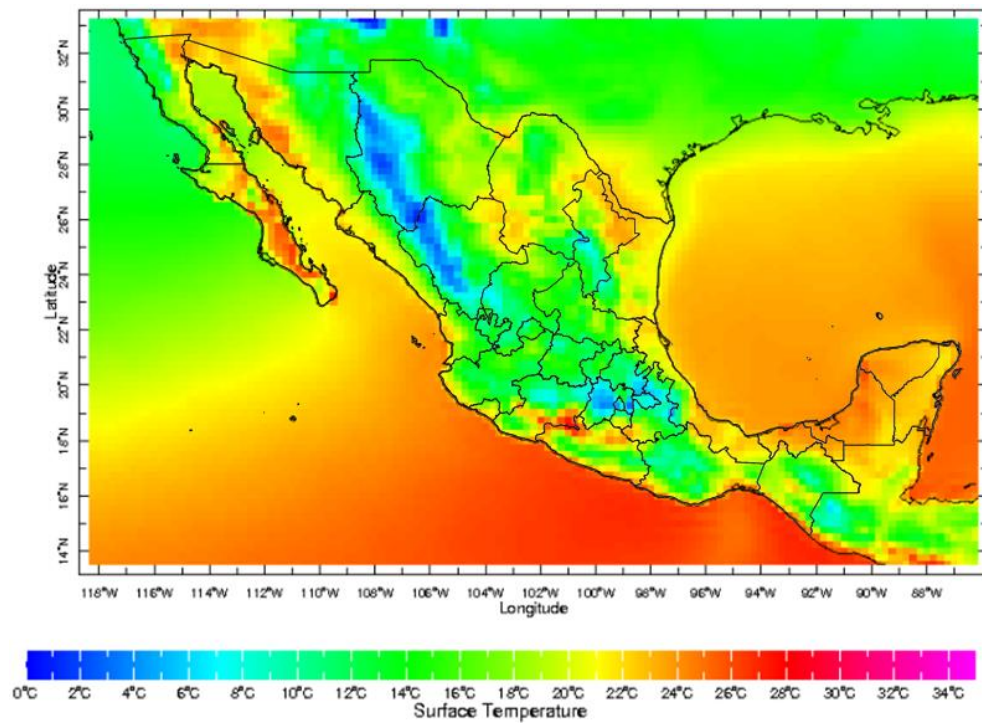


Figura 19. Temperatura de superficie anual (°C), 1980-2019. ERA5.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en su producto de uso de suelo y vegetación detalla la ubicación, distribución y extensión de diferentes comunidades vegetales y usos agrícolas. Dicha información geográfica digital contiene datos estructurados en forma vectorial aplicables a las diferentes unidades ecológicas (comunidades vegetales y usos antrópicos) contenidos en el conjunto de datos. La información data del año 1980 hasta la actualidad (Figura 14). La información de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, cuenta con siete parámetros denominados: Serie I (SI), elaborada entre 1979 y 1991, Serie II (SII), entre 1995 y 2000, Serie III (SIII), entre 2002 y 2005, Serie IV (SIV) entre 2007 y 2010, la Serie V (SV) entre 2011 y 2014, la Serie VI (SVI) entre 2015 y 2017 y la Serie VII (SVII) entre 2018 y 2021.

Asimismo, los índices espectrales juegan un papel importante en el monitoreo de las variaciones en el uso de suelo (Matsushita *et al.*, 2007). El Índice de Vegetación Mejorado (EVI, por sus siglas en inglés) es un índice de vegetación común que fue desarrollado para optimizar la señal de vegetación y mejorar la sensibilidad para mejorar el monitoreo de la vegetación a través de un desacoplamiento de la señal de fondo del dosel y las influencias de la atmósfera (Figura 20) (Liu *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 2007; de Almeida *et al.*, 2008). El índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI, por sus siglas en inglés) se emplea para determinar el contenido de agua en la en la biomasa y la vegetación permitiendo detectar el estrés hídrico (Khalid *et al.*, 2021).

Para cuantificar la dinámica de uso/cobertura del suelo, se generaron matrices de transición de uso del suelo, basadas del análisis del sistema en diferentes periodos de tiempo; es el enfoque más común, ya que proporciona información detallada sobre la clase de cambio "desde un período-hasta otro período de tiempo". La matriz tradicional de tabulación cruzada o matriz de transición sigue el formato de la Figura 21, donde las filas muestran las categorías de la fecha 1 y las columnas muestran las categorías de la fecha 2. La notación P_{ij} denota la proporción del paisaje que experimenta una transición de la categoría i a la categoría j donde el número de categorías es j . Las entradas en la diagonal indican persistencia, por lo que P_{jj} denota la proporción del paisaje que muestra la persistencia de la categoría j . Las entradas fuera de la diagonal indican una transición de la categoría i a una categoría j diferente. En la columna Total, la notación P_{i+} denota la proporción del paisaje en la categoría i en el tiempo 1, que es la suma de todos los j de P_{ij} .

En la fila Total, la notación P_{+j} denota la proporción del paisaje en la categoría j en el tiempo 2, que es la suma de todos los i de P_{ij} . La columna final a la derecha indica la proporción del paisaje que experimenta una pérdida bruta de categoría i entre el momento 1 y el momento 2. La fila final en la parte inferior indica la proporción del paisaje que experimenta una ganancia bruta de la categoría j entre la fecha 1 y la fecha 2 (Pontius Jr *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2017).

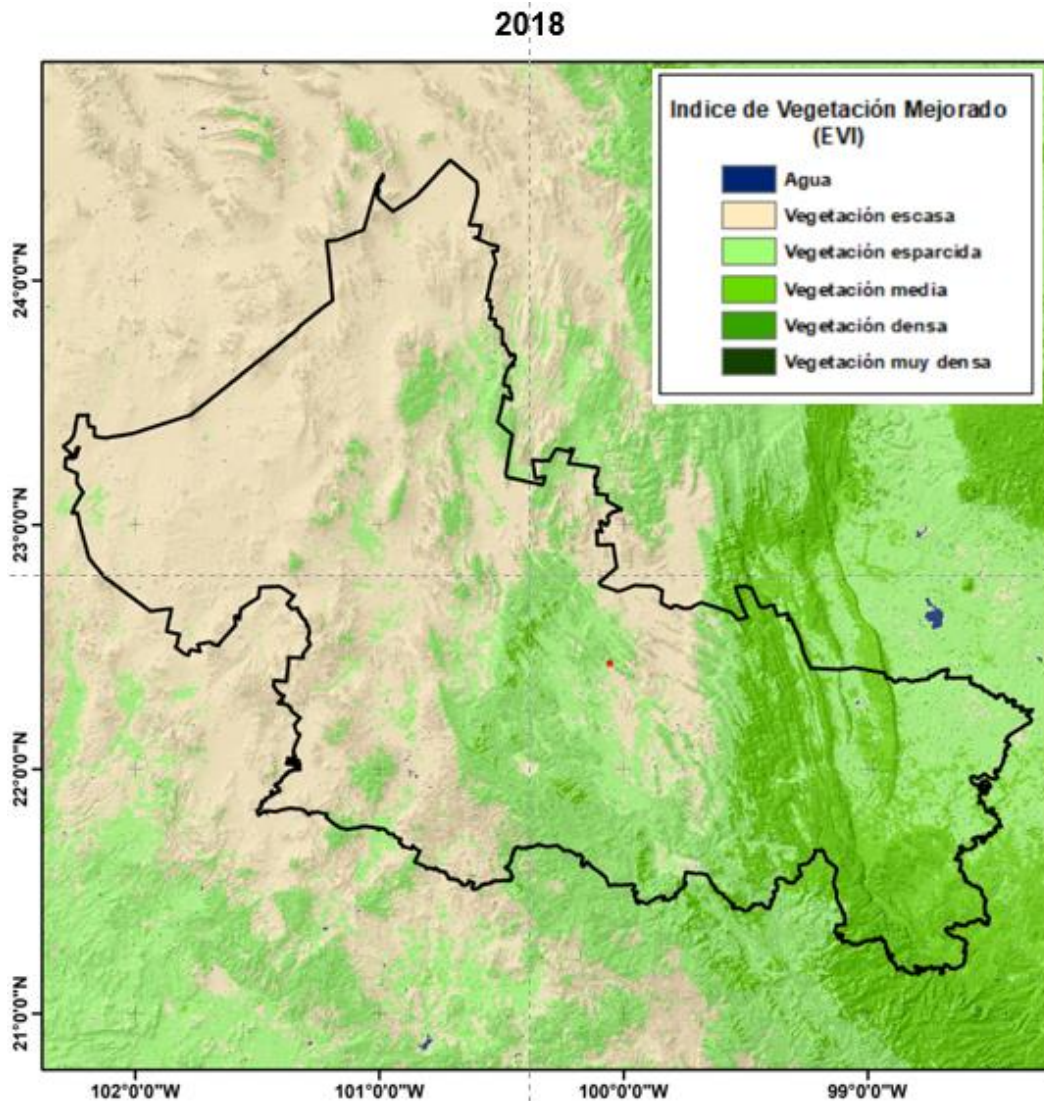


Figura 20. Índice de vegetación mejorado. 2017-2019.

		fecha 1 (f ₁)				
		Categoría 1 (f ₁)	Categoría 2 (f ₁)	Categoría 3 (f ₁)	Categoría n (f ₁)	Total (f ₁)
fecha 2 (f ₂)	Categoría 1 (f ₂)	Categoría 1 (f₁) Categoría 1 (f ₂)	Categoría 2 (f ₁) Categoría 1 (f ₂)	Categoría 3 (f ₁) Categoría 1 (f ₂)	Categoría n (f ₁) Categoría 1 (f ₂)	Total Categoría 1 (f ₂)
	Categoría 2 (f ₂)	Categoría 1 (f ₁) Categoría 2 (f ₂)	Categoría 2 (f₁) Categoría 2 (f₂)	Categoría 3 (f ₁) Categoría 2 (f ₂)	Categoría n (f ₁) Categoría 2 (f ₂)	Total Categoría 2 (f ₂)
	Categoría 3 (f ₂)	Categoría 1 (f ₁) Categoría 3 (f ₂)	Categoría 2 (f ₁) Categoría 3 (f ₂)	Categoría 3 (f₁) Categoría 3 (f₂)	Categoría n (f ₁) Categoría 3 (f ₂)	Total Categoría 3 (f ₂)
	Categoría n (f ₂)	Categoría 1 (f ₁) Categoría n (f ₂)	Categoría 2 (f ₁) Categoría n (f ₂)	Categoría 3 (f ₁) Categoría n (f ₂)	Categoría n (f₁) Categoría n (f₂)	Total Categoría n (f ₂)
	Total (f ₂)	Total Categoría 1 (f ₂)	Total Categoría 2 (f ₂)	Total Categoría 3 (f ₂)	Total Categoría n (f ₂)	Suma de los totales

Figura 21. Matriz de transición. Fuente: Pontius Jr *et al.*, 2004.

Para detectar cambios en el clima se necesita analizar las variaciones de las estadísticas climatológicas de un periodo determinado con respecto a la estadística de largo plazo. Para la estimación de perturbaciones climáticas se emplearon cálculos de anomalías climáticas y de patrones de desplazamiento. Las anomalías climáticas expresan desviaciones del comportamiento de la variable climática analizada respecto al promedio hiperanual de una serie igual o superior a 30 años.

$$A_X = X_i - X_m$$

Donde:

A_X = Anomalía climática para la variable X en estudio.

X_i = Valor de la variable para el año i .

X_m = Media aritmética hiperanual de la serie de datos.

Los patrones de desplazamiento se determinan como las desviaciones de los valores promedio mensuales de las variables climáticas para un determinado periodo

considerando funciones de densidad de probabilidad y estadísticas descriptivas. Asimismo, para identificar las diferencias en la climatología medias de distintos periodos, se emplea una substracción entre la media aritmética del periodo base y segundo periodo a comparar (Brown-Manrique *et al.*, 2015; Bernhardt *et al.*, 2018).

$$D_X = X_m - X'_m$$

Donde:

D_X = Diferencia climática para la variable X en el estudio.

X_m = Media aritmética del periodo base.

X'_m = Media aritmética del periodo 2.

CONCLUSIONES

Este trabajo es una muestra de la influencia que los cambios en la cobertura vegetal tienen en la atmósfera, y de cómo los cambios de uso de suelo son un factor importante en la modificación del clima, como sucede en el estado de San Luis Potosí al alterar por décadas las propiedades ambientales del sitio. Las actividades humanas como la expansión agrícola han reducido la cobertura forestal y de otros tipos de vegetación en la Huasteca, transformando en diferentes grados los ecosistemas según el nivel de productividad de la Región. Los estudios observacionales y con modelos del clima permiten mostrar que los efectos biofísicos influyen en el clima a escala local y regional. Por ello, la dinámica de los ecosistemas es una parte importante del sistema climático, ya que los cambios en el uso de suelo y vegetación alteran el albedo, la rugosidad y la humedad de suelo. Por esta razón es importante tener en cuenta los cambios en el uso de suelo cuando se habla de cambio climático de origen antrópico, ya que pequeños cambios provocan transformaciones en las propiedades físicas de la superficie, lo que da lugar a respuestas climáticas en la zona debido a la modificación del intercambio de energía entre la biósfera y la atmósfera, siendo fundamental determinar con precisión la partición de energía disponible en flujo de calor sensible y flujo de calor latente (calentamiento o enfriamiento de la superficie), así como la disponibilidad de humedad, que determinará cuál proceso será el dominante en una amplia gama de escalas espaciales y temporales.

El estudio proporciona datos confiables, que son útiles para la detección y el refinamiento de las políticas de conservación destinadas a proteger la vegetación a diferentes niveles que a su vez alteran las propiedades físicas de las superficies afectando el clima de la Región. Sin embargo, es necesario realizar pruebas específicas para valorar los efectos que tiene el cambio de uso de suelo en el clima. Estudios recientes muestran que las tendencias en los cambios de la vegetación en un clima cambiante parecen ser diferentes lo que muchos mencionan como un proceso de deforestación global. Será necesario analizar para el caso particular de México y de la Huasteca, cómo son las respuestas de un nuevo clima sobre la deforestación si se permite que ésta se recupere de forma natural, en un proceso de sucesión.

La importancia de los cambios del uso de suelo abre nuevas posibilidades de entender el cambio climático, no sólo por cuestiones de discurso, sino por lo que significa en términos de servicios ecosistémicos, de seguridad y calidad de vida para muchas comunidades. La zona de la Huasteca ha transformado enormemente su paisaje en aras de contar con agricultura y ganadería, pero los costos de tal proceso, ambientales, económicos y ambientales son muy altos por lo que es necesario hacer un balance de las ventajas de transitar a una economía que ofrece ganancias a corto plazo sin las ventajas de mantener servicios ambientales. El trabajo que se realice en esta dirección será de gran importancia para definir nuevas políticas de desarrollo para la Región en su conjunto y para el estado de San Luis Potosí en particular.

LITERATURA CITADA

- Al-Sharafany, D. (2021). Soil moisture retrieval from the AMSR-E. In *Agricultural Water Management* (pp. 241-277). Academic Press.
- Arendt, C. A., Hyland, E. G., & Piliouras, A. (2021). The Geological Consequences of Global Climate Change.
- Avalos, H. C., Manson, R., & Martínez, J. D. N. (2020). Evaluación de la focalización del Programa Sembrando Vida.
- Balvanera, P., Quijas, S., Karp, D. S., Ash, N., Bennett, E. M., Boumans, R., ... & Walz, A. (2017). Ecosystem services. In *The GEO handbook on biodiversity observation networks* (pp. 39-78). Springer, Cham.
- Barbier, E. B., & Burgess, J. C. (2015). Sustainable development: an economic perspective.
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, weather and climate*. Routledge.
- Battisti, C., Poeta, G., & Fanelli, G. (2016). An introduction to disturbance ecology. *Cham: Springer*, 13-29.
- Bernhardt, J., Carleton, A. M., & LaMagna, C. (2018). A comparison of daily temperature-averaging methods: Spatial variability and recent change for the CONUS. *Journal of Climate*, 31(3), 979-996.
- Bindoff, N. L., Stott, P. A., AchutaRao, K. M., Allen, M. R., Gillett, N., Gutzler, D., ... & Zhang, X. (2013). Detection and attribution of climate change: from global to regional.
- Birkhofer, K., Diehl, E., Andersson, J., Ekroos, J., Früh-Müller, A., Machnikowski, F., ... & Smith, H. G. (2015). Ecosystem services—current challenges and opportunities for ecological research. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2, 87.
- Bonan, G. (2015). *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge University Press.
- Bonilla-Moheno, M., & Aide, T. M. (2020). Beyond deforestation: Land cover transitions in Mexico. *Agricultural Systems*, 178, 102734. doi:10.1016/j.agry.2019.102734.
- Bosilovich, Michael, Cullather, Richard & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2019). "The Climate Data Guide: NASA's MERRA2 reanalysis." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nasas-merra2-reanalysis>.

- Bravo Peña, L. C., Doode Matsumoto, O. S., Castellanos Villegas, A. E., & Espejel Carbajal, I. (2010). Políticas rurales y pérdida de cobertura vegetal: Elementos para reformular instrumentos de fomento agropecuario relacionados con la apertura de praderas ganaderas en el noroeste de México. *Región y sociedad*, 22(48), 3-35.
- Brenner, L. (2018). Los impactos ambientales de las políticas públicas en los manglares de Chiapas, México: Una consecuencia de la falta de integración de la política ambiental. *Gestión y política pública*, 27(1), 237-267.
- Brown-Manrique, O., Gallardo-Ballat, Y., Correa-Santana, A., & Barrios-García, S. (2015). El cambio climático y sus evidencias en las precipitaciones. *Ingeniería hidráulica y Ambiental*, 36(1), 88-101.
- Bullock, P. (2005). Climate change impacts. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 254-262.
- Burakowski, E., Tawfik, A., Ouimette, A., Lepine, L., Novick, K., Ollinger, S., & Bonan, G. (2018). The role of surface roughness, albedo, and Bowen ratio on ecosystem energy balance in the Eastern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 367-376.
- Cai, Guoyin, *et al.* "Detailed urban land use land cover classification at the metropolitan scale using a three-layer classification scheme." *Sensors* 19.14 (2019): 3120.
- Chapagain, A., & James, K. (2013). Accounting for the impact of food waste on water resources and climate change. *Food Industry Wastes: Assessment and Recuperation of Commodities*. San Diego: Academic Press, Elsevier, 217-36.
- Chapin, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011). The ecosystem concept. In *Principles of terrestrial ecosystem ecology* (pp. 3-22). Springer, New York, NY.
- Cogley, G., (2012). Chapter 8 - The Future of the World's Glaciers. *The Future of the World's Climate (Second Edition)*, Elsevier. 197-222.
- Cohen, S., & Stanhill, G. (2021). Changes in the Sun's radiation: the role of widespread surface solar radiation trends in climate change: dimming and brightening. In *Climate change*, 687-709. Elsevier.
- Contreras-Servin, C. & Algara-Siller, M. (2009). Chapter 23 - Drought and Climate Change on the Huasteca Region in the State of San Luis Potosi, *Environmental Engineering and Management (First Edition)*, ATINER. 285-300.
- Comisión Nacional del Agua (México). (2015). *Estadísticas del agua en México, edición 2015*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua.

- Czúcz, B., Arany, I., Potschin-Young, M., Bereczki, K., Kertész, M., Kiss, M., & Haines-Young, R. (2018). Where concepts meet the real world: A systematic review of ecosystem service indicators and their classification using CICES. *Ecosystem Services*, 29, 145-157.
- Daoxian, Y. (2013). Variations of Karst Geomorphology over Geoclimatic Gradients. *Treatise on Geomorphology*, 319-326.
- de Almeida, A. Q., da Silva, G. F., Pezzopane, J. E. M., & Ribeiro, C. A. D. (2008). Enhanced Vegetation Index (EVI) na análise da dinâmica da vegetação da reserva biológica de Sooretama, ES. *Revista Árvore*, 32(6), 1099-1107.
- De Palma, A., Sanchez-Ortiz, K., Martin, P. A., Chadwick, A., Gilbert, G., Bates, A. E., ... & Purvis, A. (2018). Challenges with inferring how land-use affects terrestrial biodiversity: study design, time, space and synthesis. In *Advances in ecological research* (Vol. 58, pp. 163-199). Academic Press.
- Dee, Dick & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2022). "The Climate Data Guide: ERA5 atmospheric reanalysis." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era5-atmospheric-reanalysis>.
- Dell, J. E., Salcido, D. M., Lumpkin, W., Richards, L. A., Pokswinski, S. M., Loudermilk, E. L., ... & Dyer, L. A. (2019). Interaction diversity maintains resiliency in a frequently disturbed ecosystem. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 145.
- Dessler, A. E., & Zelinka, M. D. (2015). Climate and climate change. *Climate feedbacks*.
- Ellis, E. A., Navarro Martínez, A., García Ortega, M., Hernández Gómez, I. U., & Chacón Castillo, D. (2020). Forest cover dynamics in the Selva Maya of Central and Southern Quintana Roo, Mexico: deforestation or degradation? *Journal of Land Use Science*, 15(1), 25-51.
- Ellis, J. T., & Sherman, D. J. (2013). *Fundamentals of Aeolian Sediment Transport: Wind-Blown Sand*.
- Elobeid, A., Moreira, M. M., De Lima, C. Z., Carriquiry, M., & Harfuch, L. (2019). Implications of biofuel production on direct and indirect land use change: Evidence from Brazil. In *Biofuels, Bioenergy and Food Security* (pp. 125-143). Academic Press.
- Escolano, J. J., Pedreño, J. N., Lucas, I. G., Candel, M. B. A., & Zorpas, A. A. (2018). Decreased organic carbon associated with land management in Mediterranean environments. In *Soil Management and Climate Change*, 1-13. Academic Press.
- FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome.

- Felton, A., Felton, A. M., Wam, H. K., Witzell, J., Wallgren, M., Löf, M., ... & Hedwall, P. O. (2022). Forest biodiversity and ecosystem services from spruce-birch mixtures: The potential importance of tree spatial arrangement. *Environmental Challenges*, 6, 100407.
- Fletcher, W. D., & Smith, C. B. (2020). *Reaching Net Zero: What it Takes to Solve the Global Climate Crisis*. Elsevier.
- Foley, J. A., Costa, M. H., Delire, C., Ramankutty, N., & Snyder, P. (2003). Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(1), 38-44.
- Foster, G. R. (2005). Terraces and terracing, 135-143.
- Fuchs, M. (2005). Energy Balance. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier. 438-441.
- García-Jiménez, LE. 2017. Diversidad y Estructura de Especies Leñosas en Dos Condiciones de Selva Mediana Subperennifolia en Escárcega, Campeche. Tesis. Ing. Forestal. Coahuila, México, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 91 p. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/42735/K65039%20Garc%20C3%ADa%20Jim%20C3%A9nez%20Luis%20Enrique.pdf?sequence=1>.
- Green, J. K., Konings, A. G., Alemohammad, S. H., Berry, J., Entekhabi, D., Kolassa, J., & Gentile, P. (2017). Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere. *Nature geoscience*, 10(6), 410-414.
- Guerova, G., Simeonov, T. (2022). Climate monitoring with GNSS (GNSS-C), Global Navigation Satellite System Monitoring of the Atmosphere, Elsevier. 101-127.
- Gutiérrez-Hernández, O., & García, L. V. (2021). Relationship between precipitation and species distribution. In *Precipitation*, 239-259. Elsevier.
- Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. 2013. "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." *Science* 342 (15 November): 850–53. Data available from: earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest.
- Harms, T. K., Sponseller, R. A., & Grimm, N. B. (2018). Desert streams. In *Encyclopedia of Ecology*, 439-446. Elsevier.
- He, T., Wang, D., & Qu, Y. (2018). Land Surface Albedo. *Comprehensive Remote Sensing*, Elsevier. 140-162.

- Hidalgo, H. G., Das, T., Dettinger, M. D., Cayan, D. R., Pierce, D. W., Barnett, T. P., ... & Nozawa, T. (2009). Detection and attribution of streamflow timing changes to climate change in the western United States. *Journal of Climate*, 22(13), 3838-3855.
- Hillel, D. (2005). Thermal properties and processes. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 156-163.
- Hoque, M. Z., Islam, I., Ahmed, M., Hasan, S. S., & Prodhan, F. A. (2022). Spatio-temporal changes of land use land cover and ecosystem service values in coastal Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(1), 173-180.
- Hoque, M. Z., Islam, I., Ahmed, M., Hasan, S. S., & Prodhan, F. A. (2022). Spatio-temporal changes of land use land cover and ecosystem service values in coastal Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(1), 173-180.
- Hungate, B. A., & Koch, G. W. (2015). Global Change: Biospheric Impacts and Feedbacks. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition*, 132-140. Elsevier Inc.
- Jach, L., Warrach-Sagi, K., Ingwersen, J., Kaas, E., & Wulfmeyer, V. (2020). Land Cover Impacts on Land-Atmosphere Coupling Strength in Climate Simulations With WRF Over Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18), e2019JD031989.
- Jaibi, O., Doelman, A., Chirilus-Bruckner, M., & Meron, E. (2020). The existence of localized vegetation patterns in a systematically reduced model for dryland vegetation. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 412, 132637.
- Khalid, H. W., Khalil, R. M. Z., & Qureshi, M. A. (2021). Evaluating spectral indices for water bodies extraction in western Tibetan Plateau. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 619-634.
- Knutson, T., Kossin, J., Mears, C., Perlwitz, J., & Wehner, M. (2017). Detection and attribution of climate change.
- Kominoski, J. S., Gaiser, E. E., & Baer, S. G. (2018). Advancing theories of ecosystem development through long-term ecological research. *BioScience*, 68(8), 554-562.
- Kröel-Dulay, G., Ransijn, J., Schmidt, I. K., Beier, C., De Angelis, P., De Dato, G., ... & Penuelas, J. (2015). Increased sensitivity to climate change in disturbed ecosystems. *Nature communications*, 6(1), 1-7.

- Kumar, V., Ranjan, D., & Verma, K. (2021). Global climate change: the loop between cause and impact. In *Global Climate Change*, 187-211. Elsevier.
- Kyker-Snowman, E., Lombardozzi, D. L., Bonan, G. B., Cheng, S. J., Dukes, J. S., Frey, S. D., ... & Grandy, A. S. (2022). Increasing the spatial and temporal impact of ecological research: A roadmap for integrating a novel terrestrial process into an Earth system model.
- Lausch, A., Bastian, O., Klotz, S., Leitão, P. J., Jung, A., Rocchini, D., ... & Knapp, S. (2018). Understanding and assessing vegetation health by in situ species and remote-sensing approaches. *Methods in ecology and evolution*, 9(8), 1799-1809.
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 33(2), 457-465.
- Lopes, L. F., Oliveira, S. C., Neto, C., & Zêzere, J. L. (2020). Vegetation evolution by ecological succession as a potential bioindicator of landslides relative age in Southwestern Mediterranean region. *Natural Hazards*, 103(1), 599-622.
- Lu, X., Zhang, L., & Shen, L. (2021). Tropospheric ozone interacts with weather and climate. In *Air Pollution, Climate, and Health* (pp. 15-46). Elsevier.
- Ludwig, C., & Steffen, W. (2017). The 1950s as the beginning of the Anthropocene. *Encyclopedia of the Anthropocene* (Dellasala, DA & Goldstein, MI, eds). Elsevier, Amsterdam, 45-56.
- Mackay, A. W. (2015). Anthropocene Epoch. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 722-727.
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica internacional*, 42(3), 313-330.
- Manson, R., Jardel, E., Jiménez, M., & Escalante, C. (2009). Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico. *Capital natural de México*, 2, 131-184.
- Matsushita, Bunkei, *et al.* "Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest." *Sensors* 7.11 (2007): 2636-2651.
- Mehra, P., Baker, J., Sojka, R. E., Bolan, N., Desbiolles, J., Kirkham, M. B., ... & Gupta, R. (2018). A review of tillage practices and their potential to impact the soil carbon dynamics. *Advances in agronomy*, 150, 185-230.

- Mendelsohn, R., Kurukulasuriya, P., Basist, A., Kogan, F., & Williams, C. (2007). Climate analysis with satellite versus weather station data. *Climatic Change*, 81(1), 71-83.
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R. O., Galicia, L., & Kraxner, F. (2019). Identifying hotspots of land use cover change under socioeconomic and climate change scenarios in Mexico. *Ambio*, 48(4), 336-349.
- Menon, S., Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., ... & Zhang, X. (2007). *Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry* (No. LBNL-464E). Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA (United States).
- Merchant, C. J., Minnett, P. J., Beggs, H., Corlett, G. K., Gentemann, C., Harris, A. R., & Maturi, E. (2019). Global sea surface temperature. In *Taking the Temperature of the Earth*, 5-55. Elsevier.
- Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Pompa-García, M., & Aguirre-Salado, C. A. (2013). Tasa de deforestación en San Luis Potosí, México (1993-2007). *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(2), 201-215.
- Molloy, S. L., Dreelin, E. A., & Rose, J. B. (2008). Extreme weather events and human health.
- Monjardin-Armenta, S. A., Plata-Rocha, W., Pacheco-Angulo, C. E., Franco-Ochoa, C., & Rangel-Peraza, J. G. (2020). Geospatial Simulation Model of Deforestation and Reforestation Using Multicriteria Evaluation. *Sustainability*, 12(24), 10387.
- Müller, F., Fohrer, N., & Chicharo, L. (2015). The basic ideas of the ecosystem service concept. In *Ecosystem Services and River Basin Ecohydrology*, 7-33. Springer, Dordrecht.
- National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2017). "The Climate Data Guide: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>.
- Nehzak, H. K., Aghaei, M., Mostafazadeh, R., & Rabiei-Dastjerdi, H. (2022). Evaluation of land use change predictions using CA-Markov model and management scenarios. In *Computers in Earth and Environmental Sciences* (pp. 105-115). Elsevier.
- Nielsen, S. N., Fath, B., Bastianoni, S., Marques, J. C., Muller, F., Patten, B. D., ... & Tiezzi, E. (2020). *A new ecology: systems perspective*. Elsevier.

- Nigam, S., & Baxter, S. (2015). Teleconnections. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, G. North, Ed. *Elsevier Science*, 90, 109.
- Ochoa-Noriega, C. A., Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., & Mesa-Vázquez, E. (2021). Overview of Research on Sustainable Agriculture in Developing Countries. The Case of Mexico. *Sustainability*, 13(15), 8563.
- Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2005). *Fundamentals of ecology* 5th Edition. 613 p.
- Ottlé, C., & Mahfouf, J. F. (2016). Data Assimilation of Satellite Observations. In *Microwave Remote Sensing of Land Surface* (pp. 357-382). Elsevier.
- Pandey, D. K., Putrevu, D., & Misra, A. (2021). Large-scale soil moisture mapping using Earth observation data and its validation at selected agricultural sites over Indian region. In *Agricultural Water Management* (pp. 185-207). Academic Press.
- Paul, B. K., & Rashid, H. (2017). Climatic hazards in coastal Bangladesh. *Science Direct*, 153-182.
- Peralta-Rivero, C., Contreras Servín, C., Galindo Mendoza, M. G., Algara Siller, M., & Mas Caussef, J. F. (2014). Deforestation rates in the Mexican Huasteca Region (1976-2011). *Journal de Ciencia y Tecnologia Agraria*, 1.
- Pereira, H. M., Reyers, B., Watanabe, M., Bohensky, E., Foale, S., Palm, C., ... & Gomes, I. (2005). Condition and trends of ecosystem services and biodiversity. *Island Press*.
- Pielke, R. A., Avissar, R., Raupach, M., Dolman, A. J., Zeng, X., & Denning, A. S. (2003). Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Global change biology*, 4(5), 461-475.
- Pontius Jr, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, ecosystems & environment*, 101(2-3), 251-268.
- Potter, G. L., Carriere, L., Hertz, J., Bosilovich, M., Duffy, D., Lee, T., & Williams, D. N. (2018). Enabling reanalysis research using the collaborative reanalysis technical environment (CREATE). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(4), 677-687.
- Prevedello, J. A., Winck, G. R., Weber, M. M., Nichols, E., & Sinervo, B. (2019). Impacts of forestation and deforestation on local temperature across the globe. *PLOS ONE*, 14(3), e0213368. doi:10.1371/journal.pone.0213368.
- Randel, W. J. (2003). MIDDLE ATMOSPHERE| Zonal Mean Climatology. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 1358-1365.

- Riis, T., Kelly-Quinn, M., Aguiar, F. C., Manolaki, P., Bruno, D., Bejarano, M. D., ... & Dufour, S. (2020). Global overview of ecosystem services provided by riparian vegetation. *BioScience*, 70(6), 501-514.
- Rocha-Escalante, H., Jaimes-Arredondo, A., Cardona-Benavides, A., Rodríguez-Cuevas, C., Giacomán-Vallejos, G., Aceves-de Alba, J., ... & Cisneros-Almazán, R. (2022). Rainfall and temperature trends in the Altiplano Potosino Region, Mexico (1975-2015). *Tecnología y ciencias del agua*, 13(4), 75-126.
- Rolando, J. L., Turin, C., Ramírez, D. A., Mares, V., Monerris, J., & Quiroz, R. (2017). Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 221-233.
- S.A. Changnon. (2015). Inadvertant Weather Modification. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*, Academic Press. 332-335.
- Shrestha, R. P. (2017). Modeling Effect of Conservation and Livelihood Policies on Community Land Use and Management in Yogyakarta. In *Redefining Diversity & Dynamics of Natural Resources Management in Asia, Volume 1*. 67-90. Elsevier.
- Snyder, C. W., Mastrandrea, M. D., & Schneider, S. H. (2011). The Complex Dynamics of the Climate System: Constraints on our Knowledge, Policy Implications and the Necessity of Systems Thinking. In *Philosophy of Complex Systems*, 467-505. North-Holland.
- Stephenson, M. (2018). Energy and Climate Change: Geological Controls, Interventions and Mitigations. *Energy and Climate Change*, 175-178.
- Stott, P. A., Gillett, N. P., Hegerl, G. C., Karoly, D. J., Stone, D. A., Zhang, X., & Zwiers, F. (2010). Detection and attribution of climate change: a regional perspective. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(2), 192-211.
- Tansley, A.G. 1935. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16 (3): 284-307.
- Tewabe, D., & Fentahun, T. (2020). Assessing land use and land cover change detection using remote sensing in the Lake Tana Basin, Northwest Ethiopia. *Cogent Environmental Science*, 6(1), 1778998.
- Turner, M. G., Romme, W. H., Gardner, R. H., O'Neill, R. V., & Kratz, T. K. (1993). A revised concept of landscape equilibrium: disturbance and stability on scaled landscapes. *Landscape ecology*, 8(3), 213-227.

- University of Maryland and World Resources Institute. "Global Primary Forest Loss". Accessed through Global Forest Watch on 04/07/2022 from www.globalforestwatch.org.
- Unninayar, S., & Olsen, L. M. (2015). Monitoring, observations, and remote sensing—global dimensions. *Earth Systems and Environmental Sciences*.
- Virginia, R. A., & Wall, D. H. (2013). Ecosystem function, principles of. *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)*, 90-95.
- Waliser, D. E., & Jiang, X. (2014). Tropical Meteorology: Intertropical Convergence Zone, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*.
- Wang, C., Li, J., Liu, Q., Zhong, B., Wu, S., & Xia, C. (2017). Analysis of differences in phenology extracted from the enhanced vegetation index and the leaf area index. *Sensors*, 17(9), 1982.
- Winter, S., Bauer, T., Strauss, P., Kratschmer, S., Paredes, D., Popescu, D., ... & Batáry, P. (2018). Effects of vegetation management intensity on biodiversity and ecosystem services in vineyards: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 55(5), 2484-2495.
- Yu, G., Piao, S., Zhang, Y., Liu, L., Peng, J., & Niu, S. (2021). Moving toward a new era of ecosystem science. *Geography and Sustainability*, 2(3), 151-162.
- Yuan, H., Toth, Z., Peña, M., & Kalnay, E. (2019). Overview of weather and climate systems. In *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. 35-65. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Zhang, B., Zhang, Q., Feng, C., Feng, Q., & Zhang, S. (2017). Understanding land use and land cover dynamics from 1976 to 2014 in Yellow River Delta. *Land*, 6(1), 20.
- Zhang, Z., & Moore, J. C. (2014). *Mathematical and physical fundamentals of climate change*. Elsevier.
- Zhao, Y., Tang, J., Graham, C., Zhu, Q., Takagi, K., & Lin, H. (2012). Hydrogeology in the ridge and valley: Soil moisture patterns and preferential flow dynamics in two contrasting landscapes. *Hydrogeology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology; Lin, H., Ed*, 381-411.
- Zobeck, T. M., & Van Pelt, R. S. (2006). Wind-induced dust generation and transport mechanics on a bare agricultural field. *Journal of Hazardous Materials*, 132(1), 26-38.