

Dinámica en la productividad y degradación de tierras en México

Productivity and land degradation dynamics in Mexico

Patricia Ruiz-García,* Jorge Luis García-Rodríguez** y Alejandro Ismael Monterroso-Rivas***

Recibido: 28/08/2024. Aceptado: 23/10/2024. Publicado: 17/01/2025

Resumen. La productividad de la tierra (PT) es un indicador fundamental para medir la degradación y desertificación de este recurso. En México aún no se cuenta con un estudio a escala nacional que cuantifique y analice el indicador PT en áreas con condiciones similares (cobertura de la tierra y características bioclimáticas). El objetivo de esta investigación es cuantificar el indicador de PT a escala nacional mediante la determinación de la dinámica de la productividad de la tierra (DPT) para el periodo 2000-2019. El análisis tomó como base ocho regiones climáticas dominantes con cobertura vegetal similar donde se calculó la productividad primaria neta (PPN) mediante la radiación fotosintéticamente activa incidente ($\text{MJm}^{-2} \text{año}^{-1}$), la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por los tejidos verdes y la eficiencia en el uso de la radiación solar (gMS MJ^{-1}). Posteriormente se determinó la PT a través de un análisis multitemporal de la PPN para calcular tres métricas: tendencia, estado y rendimiento. Se evaluó la dinámica de la productividad de la tierra (DPT) con la combinación de las tres métricas anteriores y se obtuvieron cinco clases: mejora, estable, estresado, moderadamente degradado y degradado. Por último, se identificaron los usos de suelo y vegetación según la dinámica y degradación de la PT en las ocho regiones climáticas. El análisis de datos se realizó utilizando el lenguaje R (v4.2.3) integrado en el sistema de información geográfica QGIS (v3.28). La PPN promedio anual varió en todo el país, desde menos de $500 \text{ g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ en la región climática árida, hasta poco más

de $3000 \text{ g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ en la región muy húmeda del país. La métrica de tendencia estable se encontró en 86% del territorio nacional. La métrica de estado de PT presentó condición estable en casi 88% del territorio, mientras que la métrica de rendimiento de PT tuvo una condición degradada en 53.2% de la superficie del país. La DPT fue estable en 78% del territorio nacional. En poco más de 70% de la superficie ocupada por tipo de uso de suelo y vegetación no hubo cambios de la DPT. Los resultados obtenidos en este estudio contribuyen a tener información cuantitativa del indicador de productividad de la tierra que puede ser de utilidad para futuras investigaciones que midan la degradación y desertificación de tierras en México.

Palabras clave: productividad primaria neta, dinámica de la productividad, degradación de tierras, regiones climáticas, uso del suelo y vegetación.

Abstract. Land productivity (LP) is considered a fundamental indicator to measure land degradation and desertification. Frequently, TP is quantified in terms of Net Primary Productivity (NPP) in order to determine land productivity dynamics (LDP) by estimating three dimensionless metrics: trend, status and yield. In Mexico, there is still no nationwide study that quantifies and analyzes the PT indicator in areas with similar conditions (land cover and bioclimatic characteristics). The objective of this research was to quantify the TP indicator on a national scale, by determining the dynamics

* Consultor Independiente. Calle Andador primavera s/n, col. Salitrería, 56150, Texcoco, Estado de México, México. ORCID: 0000-0003-3283-5996. Email: patyru31@gmail.com

** Comisión Nacional de las Zonas Áridas. Carretera a Chapala 655, col. el Álamo, 45560. Tlaquepaque, Jalisco, México. Email: jorgeluis.garcia@conaza.gob.mx

*** Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Km 38.5, carretera México-Texcoco. 56230, Texcoco, Estado de México, México. ORCID: 0000-0003-4348-8918. Email: aimrivas@correo.chapingo.mx. Autor de correspondencia.

of land productivity (DPT) in the period 2000-2019. The analysis was based on eight dominant climatic regions with similar vegetation cover where Net Primary Productivity (NPP) was calculated by incident photosynthetically active radiation ($MJm^{-2} yr^{-1}$), the fraction of photosynthetically active radiation intercepted by green tissues and solar radiation use efficiency ($gMS MJ^{-1}$). Subsequently, TP was determined through a multitemporal analysis of PPN to calculate three metrics: trend, state and yield. Land productivity dynamics (LPD) was evaluated with the combination of the above three metrics and five classes were obtained: improving, stable, stressed, moderately degraded and degraded. Finally, 20 land and vegetation uses were identified according to the dynamics and degradation of TP in the eight climatic regions. Data analysis was performed using the R language (v4.2.3) integrated in the QGIS geographic information system (v3.28). Average annual PPN varied across the country, ranging from less than $500 g m^{-2} yr^{-1}$ in the arid climate region to just over $3,000 g m^{-2} yr^{-1}$ in the very humid region of the country. The lowest PPN value was located in the very arid climatic region ($31 g m^{-2} yr^{-1}$) and the highest value ($4,366 g m^{-2} yr^{-1}$) was observed in the very humid region of the country. The stable trend metric was found in 86% of the national territory, improvement in 9.6% and decrease in 3.9% of the total national territory. The PT status metric presented stable condition in almost 88% of the territory, improvement in 10.9% and decrease in 1.3%. While the TP yield metric had a degraded condition in 53.2% of the country's surface and 46.7% was classified as non-degraded. The TPD was stable in 78% of the national territory, improvement was observed in 11.78%, degradation in 4.26%, moderate degradation

in 5.3% and stressed condition in 0.56% of the national territory. In slightly more than 70% of the area occupied by type of land use and vegetation, there were no changes in TPD. However, it was found that the 20 classes of land use and vegetation were exposed to degradation and moderate degradation of TP dynamics. The most exposed vegetation was identified in coniferous forests (humid climatic regions), coastal vegetation (sub-humid and semi-arid climatic regions), human settlements (sub-humid climatic region), secondary vegetation of arid climates and other wooded areas (mainly in semi-arid climatic regions). Although all 20 land use and vegetation classes were exposed to degradation and moderate degradation of TP dynamics, it was observed that, in all of them, the class of improvement of TP dynamics was present, mainly in areas without apparent vegetation and other wooded surfaces. According to the results obtained, it is clear that land productivity varies from one climatic region to another, and that it is dynamic through the years, so the use of multitemporal analysis is required to monitor land productivity through time. This allows having solid information necessary in decision making for the conservation and improvement of land productivity and reduction of land degradation and desertification in Mexico. The results obtained in this study contribute to have quantitative information of the land productivity indicator, which can be useful for future research measuring land degradation and desertification in Mexico.

Keywords: Net primary productivity, productivity dynamics, land degradation, climatic regions, land use and vegetation.

INTRODUCCIÓN

La productividad de la tierra (PT) juega un papel fundamental en los medios de vida sostenibles de las comunidades humanas (Sims *et al.*, 2021). Se define como la capacidad biológica de la tierra para producir alimentos, forraje, fibra y energía (Shen *et al.*, 2023). Es decir, la PT es la fijación y conversión de energía solar a compuestos de carbono orgánico realizada por la fotosíntesis de las plantas que forman la cobertura vegetal terrestre. Frecuentemente, la PT se cuantifica en términos de productividad primaria neta (PPN) y todos los organismos dependen directa o indirectamente de esta productividad, por lo que la PT refleja la capacidad para soportar biodiversidad y proveer servicios ambientales de los ecosistemas y sus interacciones, siendo un reflejo del estado que guardan; puede ser medida a partir de la PPN mediante la energía total fijada por las plantas menos la respiración de

los ecosistemas (Dengiz, 2018). Dicha energía se transforma en biomasa que, a su vez, permite que los ecosistemas desarrollen sus funciones y brinden servicios esenciales también reconocidos como servicios ecosistémicos (Gupta y Oza, 2020). Cabe mencionar, que la PT difiere de la productividad agrícola, pues esta última se refiere a la producción de biomasa que se obtiene de manera sostenible a largo plazo bajo las limitaciones del clima, fisiografía y suelo donde se establece el cultivo agrícola (Bernard *et al.*, 2022).

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD) y el Grupo Interinstitucional de Expertos sobre los Indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecieron el ODS 15.3.1, que se refiere a: "Combatir la desertificación, restaurar la tierra y suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, sequía e inundaciones, así como esforzarse por lograr un mundo neutral en

la degradación de la tierra para el año 2030” (Cui y Li, 2022; UNCCD, 2022).

Para dar seguimiento al ODS 15.3.1, la UNCCD planteó tres subindicadores clave: 1) tendencia en la cubierta terrestre, 2) la productividad de la tierra y 3) reservas de carbono orgánico por encima y por debajo del suelo (Shen *et al.*, 2023; Rotllan *et al.*, 2021). Por lo tanto, medir la PT es fundamental para evaluar la degradación y desertificación de tierras (Shen *et al.*, 2023; Cherlet *et al.*, 2018).

El *Atlas Mundial de la Desertificación* propuso medir la PT anual a lo largo del tiempo para determinar la dinámica de la productividad de la tierra (DPT) mediante la estimación de tres métricas adimensionales: tendencia, estado y rendimiento. Su finalidad es determinar si la PT ha mejorado, es estable o se ha degradado a través del tiempo (Sims *et al.*, 2021; Cherlet *et al.*, 2018). La determinación de la dinámica de la productividad (DPT) se ha utilizado en los últimos años para tener claridad sobre el estado que guarda la PT a gran escala, debido a su alta confiabilidad (Rotllan *et al.*, 2021; Sims *et al.*, 2021).

La DPT se puede obtener a escalas globales o locales mediante sensores remotos satelitales que analizan las tendencias de series temporales sensibles al crecimiento de la vegetación. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es el más utilizado (Cui y Li, 2022). El Centro Común de Investigación de Europa (CCIE) calculó la dinámica de la productividad de la tierra a nivel global, usando imágenes SPOT/NDVI entre los años 1999 a 2013 con resolución de 1 km (Rotllan *et al.*, 2021). Por otra parte, la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) actualizó la información de la dinámica de la productividad de la tierra a nivel global que calculó el CCIE, usando los años 2000 a 2021, con imágenes NDVI/MODIS a una resolución de 250 m (FAO, 2022). Recientemente, se creó la herramienta Land Productivity Dynamics in R (LPDynR) para calcular la DPT a una resolución mejorada de 250 m (Rotllan *et al.*, 2021). Esta herramienta se recomienda para asistir a los países miembros de la UNCCD en el cálculo del subindicador de PT, en donde México forma parte. La herramienta LPDynR requiere imágenes de satélite de al menos dos fechas para derivar un índice de

vegetación que muestre la dinámica de la productividad de la tierra entre ambas, dejando sin posibilidad de análisis el periodo intermedio. Para que la herramienta LPDynR arroje resultados con alta confiabilidad, se requiere aplicar en áreas con condiciones similares en términos de cobertura de la tierra y características bioclimáticas (Rotllan *et al.*, 2021).

México es un país con un relieve complejo y una alta variabilidad geológica, edáfica, climática e hidrológica, lo que ocasiona que sea un país megadiverso y dinámico en su cobertura (Sarukán *et al.*, 2017). Esto debe ser considerado al momento de calcular la DPT para obtener información precisa a nivel nacional.

Desde el año 2000 a la fecha, México ha colaborado con la UNCCD para reportar el porcentaje de tierras degradadas respecto a la superficie terrestre total (CONAZA-UACH, 2023). A pesar de los antecedentes que tiene México en el seguimiento de la degradación y desertificación de tierras, aún no se cuenta con un estudio especializado que cuantifique y analice el subindicador PT en áreas con condiciones similares (cobertura de la tierra y características bioclimáticas) considerando los nuevos criterios establecidos por la UNCCD para cumplir satisfactoriamente con el ODS 15.3.1 (CONAZA-UACH, 2023).

El objetivo de esta investigación fue cuantificar el indicador de productividad de la tierra (PT) a escala nacional en México, mediante la determinación de la dinámica de la productividad de la tierra (DPT) propuesta en el *Atlas Mundial de la Desertificación*, durante el periodo 2000-2019, considerando la diversidad climática y de cobertura vegetal del país. Los resultados de esta investigación contribuyen a obtener información cuantitativa de utilidad para evaluar la degradación y desertificación de tierras en México, tomando en cuenta los nuevos criterios establecidos por la UNCCD (Sims *et al.*, 2021).

METODOLOGÍA

Los métodos comprendieron tres etapas: 1) estimación de la PPN; 2) cálculo de las métricas (productividad y dinámica) relacionadas con la PT, así como

3) análisis de datos (prueba de Mann Kendall, mínimas, máximas, medias, desviación estándar y percentil 90%). El estudio comprendió la serie temporal de 20 años, entre 2000 y 2019 a nivel de pixel con resolución espacial de 250 m, cubriendo todo el país y considerando la diversidad climática y de cobertura vegetal de México.

Productividad Primaria Neta (PPN)

Se estimó la PPN máxima, mínima y media para el periodo de crecimiento por región climática dominante de todo el país. Se tomaron las ocho regiones climáticas de México definidas para identificar las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas del país (CONAZA-UACH, 2003) de acuerdo con los criterios de la UNCCD. El periodo de crecimiento es el número de días al año con condiciones de humedad y temperatura adecuados para que crezcan las plantas. El método sugiere que inicia cuando la precipitación es mayor que la mitad de la evapotranspiración y concluye al siguiente día cuando el valor es menor. Este estudio no consideró el resto de los días del año donde también se produce biomasa, pero a menor velocidad. El periodo de crecimiento se obtuvo de Monterroso y Gómez (2021) quienes lo determinaron a nivel de días y en cada región climática (CONAZA-UACH, 2003). Más información relacionada se presenta en el Anexo 1. La PPN fue estimada siguiendo la ecuación propuesta por Monteith (1972):

$$PPN = RFA \times fRFAA \times EUR \quad (1)$$

Donde:

PPN= Productividad Primaria Neta en $\text{gm}^{-2} \text{año}^{-1}$

RFA= Radiación Fotosintéticamente Activa Incidente ($\text{MJm}^{-2} \text{año}^{-1}$)

fRFAA= Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por los tejidos verdes

EUR= Eficiencia en el Uso de la Radiación solar (gMS MJ^{-1}).

La variable RFA se calculó mediante la Radiación Global (R_g), aplicando la fórmula de Angstrom-Prescott, que estima la radiación global a partir de los valores de la radiación solar extraterrestre (R_A), de la insolación máxima posible (N) y de la insolación medida en observatorios (n):

$$R_g = R_A \times [a + b \times (n/N)] [\text{MJ} \times \text{m}^{-2} \times \text{día}^{-1}] \quad (2)$$

Donde:

R_g = Radiación global

R_A = Radiación solar extraterrestre ($\text{MJm}^{-2} \text{día}^{-1}$)

N = Insolación (adimensional) tomada de n o el número de horas de sol efectivas ($h \text{ día}^{-1}$) y de N o la insolación máxima ($h \text{ día}^{-1}$)

$a = 0.29 \cos \theta$ (θ = latitud)

$b = 0.52$.

La información de R_A y N se obtuvieron de Ortiz y Huertas (1993), para mayor detalle ver Anexo 2 y 3. Los valores de n se tomaron de Gómez y Monterroso (2012).

Para obtener la fRFAA se utilizó la ecuación propuesta por Sims *et al.* (2006) en diferentes ecosistemas de Norteamérica:

$$fRFAA = 1.24 * NDVI - 0.168 \quad (3)$$

Donde:

fRFAA = Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por los tejidos verdes

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

El valor de NDVI se determinó con imágenes de Terra/MODIS (MOD13Q1) a una resolución de pixel de 250 m (Didan, 2021), las cuales se analizaron usando el software QGIS (v3.28). Las imágenes se obtuvieron en periodos de 16 días hasta completar el periodo de crecimiento de cada región climática. Por último, EUR se obtuvo de los datos de Garbulsky *et al.* (2010) y Field *et al.* (1995) por uso de suelo y vegetación (Anexo 4).

Cálculo de métricas

Productividad de la tierra (PT)

La productividad de la tierra (PT) se determinó con un análisis multitemporal de la productividad anual, mediante el cálculo de tres métricas: tendencia, estado y rendimiento (Sims *et al.*, 2021). La tendencia se define como el cambio de la productividad (PPN) a largo plazo en la serie temporal 2000-2019. Se calculó siguiendo la metodología establecida por Sims *et al.* (2021) para determinar

la pendiente de la tendencia del valor de z (ecuación 4) con la prueba no paramétrica de Mann Kendall (valor $p < 0.05$, nivel de confianza del 95% y tasa de error potencial de detección del 5%). Este método se seleccionó por tener la capacidad de detectar tendencias ascendentes o descendentes en series de datos temporales (Kendall, 1975; Mann, 1945), sugerido para evaluar la tendencia en series de datos ambientales (Yu *et al.*, 2007). Se obtuvo usando el lenguaje R en el sistema de información geográfica QGIS (v3.28).

$$z = \frac{PPN_{\text{punto}} - \text{media}}{\text{desviación estándar}} \quad (4)$$

Donde:

z = tendencia de la productividad de la tierra

PPN_{punto} = PPN media anual por pixel

Media = valor promedio de PPN

Desviación estándar = medida que indica la dispersión de los datos de PPN.

Se consideraron tres niveles de clasificación para z : 1) decremento cuando $z < -1.28$; 2) estable cuando $z \geq -1.28$ y $z \leq 1.28$; y 3) mejora si $z > 1.28$. (Sims *et al.*, 2021). El estado compara el nivel de productividad actual en un área determinada con observaciones históricas recientes en esa misma área. Para determinar el estado de la productividad se comparó la PPN anual de cada año entre 2015 y 2019 con el valor promedio de PPN de los 14 años anteriores (2000-2014). Se aplicó la ecuación 4 para obtener el valor de z y se clasificó con las mismas clases de tendencia usando el lenguaje R en el sistema de información geográfica QGIS (v3.28).

El rendimiento indica el nivel de productividad local en comparación con otras áreas con un potencial de productividad de la tierra similar a nivel regional (Sims *et al.*, 2021). Se estimó mediante la comparación del valor medio de PPN anual a nivel de pixel con su valor máximo de PPN. Este último fue determinado mediante el valor del percentil 90 de los valores del pixel, con el fin de evitar la sobreestimación del valor, debido a la presencia de valores atípicos (ecuación 5). Para su obtención se utilizó el lenguaje R en el sistema de información geográfica QGIS (v3.28).

$$\text{rendimiento} = \frac{(PPN_{\text{observada}})}{PPN_{\text{máx}}} \quad (5)$$

Donde:

PPN = Productividad primaria neta observada a nivel de pixel

$PPN_{\text{máx}}$ = valor máximo de PPN a nivel de pixel

Los valores resultantes del rendimiento fueron clasificados según: 1) degradado, si el rendimiento fue $< 0.5 PPN_{\text{máx}}$ y 2) no degradado, si el rendimiento fue $\geq 0.5 PPN_{\text{máx}}$ (Figura 1).

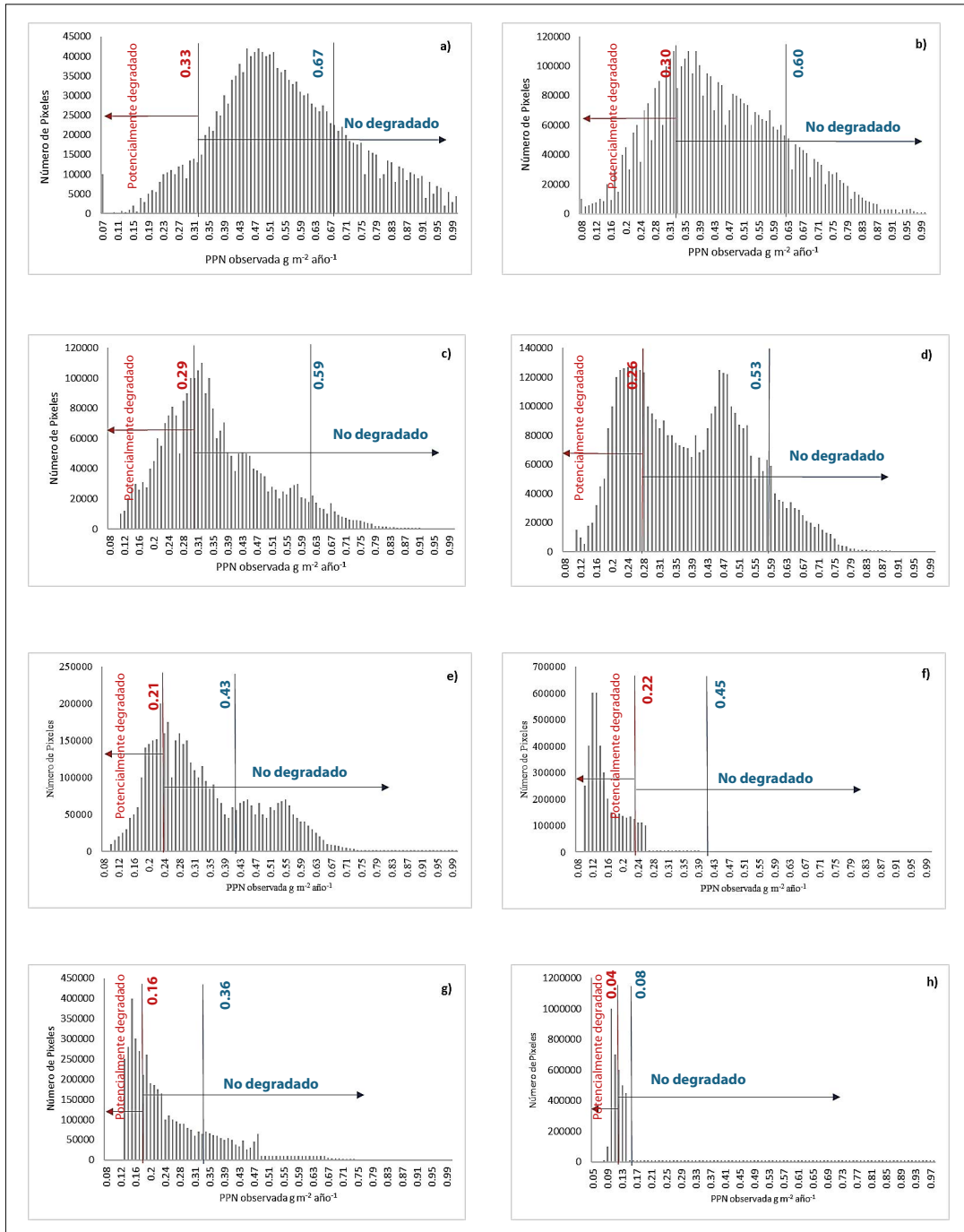
Dinámica de la productividad de la tierra (DPT)

Se evaluó la DPT en cada región climática mediante la combinación de las tres métricas anteriores para obtener cinco clases de acuerdo con Sims *et al.*, (2021): mejora, estable, estresado, moderadamente degradado y degradado (Figura 2):

Por último, se identificaron los usos de suelo y vegetación según dinámica y degradación de la PT en las ocho regiones climáticas para el periodo 2000-2019. Esto se realizó mediante una matriz que integró las capas anteriores con las cartas de uso de suelo y vegetación de las series II (INEGI, 1997), VI (INEGI, 2016) y VII (INEGI, 2018) escala 1:250 000 del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI). Para facilitar el análisis, los usos de suelo y vegetación se clasificaron en 20 categorías (Anexo 5).

Análisis de datos

El análisis de datos se realizó utilizando el lenguaje R (v4.2.3) que está integrado en el sistema de información geográfica QGIS (v3.28) para calcular la prueba de Mann Kendall (valor $p < 0.05$, nivel de confianza del 95% y tasa de error potencial de detección del 5%), mínimas, máximas, medias, desviación estándar y percentil 90%. Así mismo, mediante el uso del software QGIS (v3.28) se determinó la superficie en km^2 . Posteriormente, en una hoja de cálculo se obtuvo la tasa de cambio anual en porcentaje (ecuación 7) de la PPN promedio anual, las métricas de la dinámica de la PT (tendencia, estado y rendimiento), así como de las cinco clases de degradación de la dinámica de la



Nota: las líneas azules indican PPNmax del percentil 90%. Las líneas rojas muestran 0.5 de la PPNmáx. Píxeles donde la PPN fue menor a la mitad del valor de la PPNmáx en el percentil 90% se consideraron degradados. Píxeles mayores al 0.5 de la PPNmáx se clasificaron como no degradados. a) Región climática muy húmeda (A); b) Región climática subhúmeda húmeda (C2); c) Región climática subhúmeda seca (C1); e) Región climática semiárida húmeda (D3); f) Región climática semiárida moderada (D2); g) Región climática semiárida seca (D1), y h) Región climática árida (E).

Figura 1. Clasificación de la métrica de rendimiento de la PT en cada región climática de México.

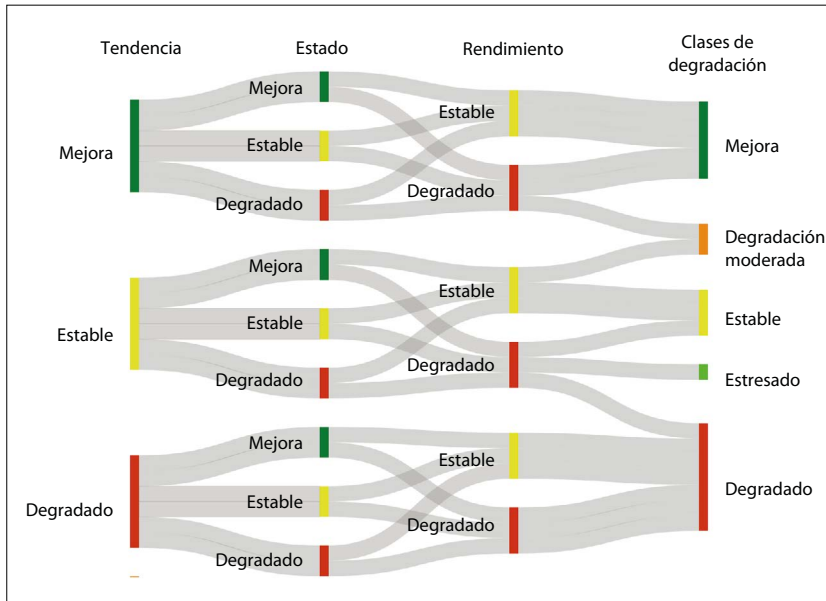


Figura 2. Combinación de métricas de PT tendencia, estado y rendimiento para obtener la evaluación de la dinámica de la PT en México. Fuente: elaboración propia con datos de Sims *et al.* (2021).

PT (degradada, disminución moderada, estresada, estable y mejora).

$$T_{anual} = ((SA_n - SA_{n-1}) / SA_{n-1}) \times 100 \quad (7)$$

Donde: T_{anual} es la tasa de cambio anual y SA es la superficie del año_n.

RESULTADOS

Productividad primaria neta (PPN)

La PPN promedio anual varió en todo el país desde menos de 500 g m⁻² año⁻¹ hasta poco más de 3000 g m⁻² año⁻¹ (Figura 3). El valor más bajo de la PPN se localizó en la región climática muy árida (E) (31 g m⁻² año⁻¹) y el valor más alto (4366 g m⁻² año⁻¹) se observó en la región muy húmeda (A) del país (Figura 3a). La superficie ocupada por PPN menor a 500 g m⁻² año⁻¹, predominó en las regiones climáticas áridas (E) y semiáridas secas y moderadas (D1 y D2 respectivamente) (Figura 3b). El rango de PPN entre 500 y 1000 g m⁻² año⁻¹ estuvo presente en la región semiárida húmeda (D3), así como en la región subhúmeda seca (C1) y subhúmeda húmeda (C2) (Figura 3b). En lo que se refiere al rango de PPN promedio anual entre 1000 y 1500 g m⁻² año⁻¹, este tuvo mayor

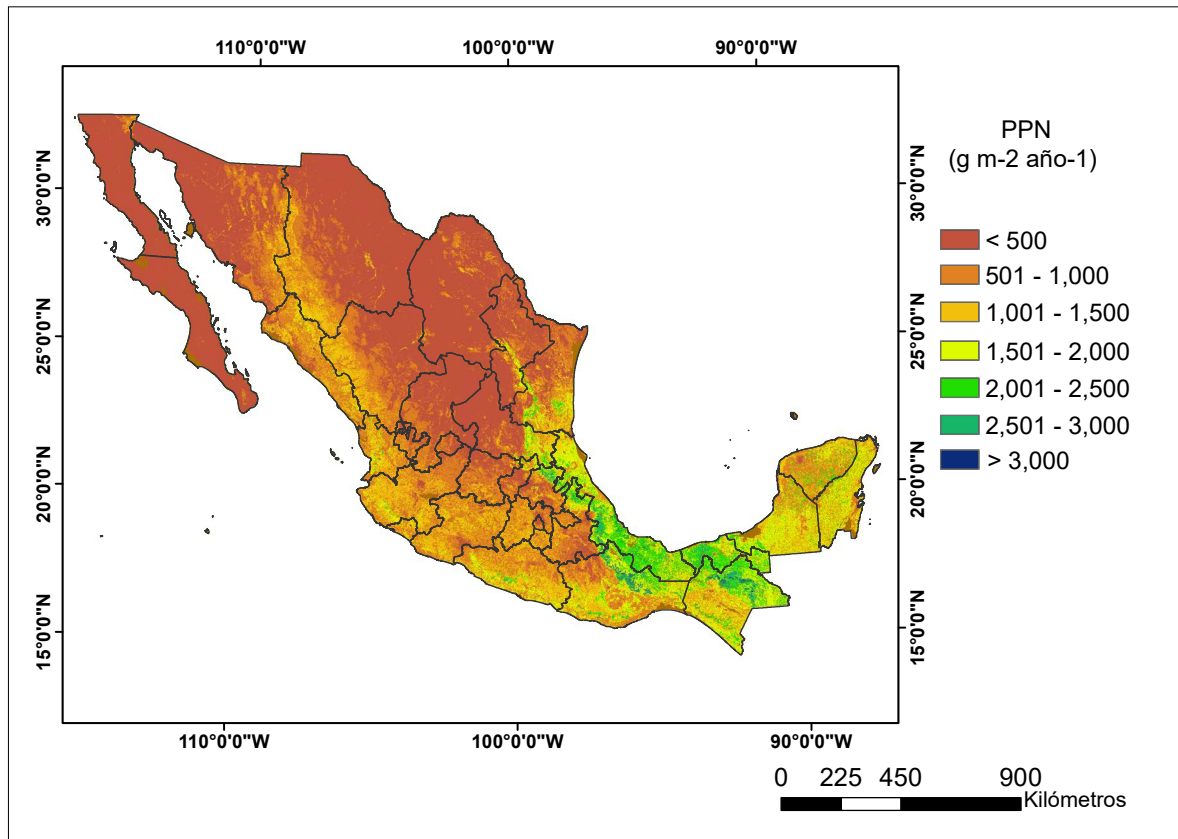
representación en la región climática húmeda (B) (Figura 3b). Mientras que, los rangos de PPN promedio anual mayores de 1500 g m⁻² año⁻¹, se encontraron con mayor presencia en la región climática muy húmeda (A) (Figura 3b).

A lo largo de la serie temporal 2000-2019 se observó que la superficie ocupada de PPN menor a 500 g m⁻² año⁻¹ disminuyó ligeramente (Figura 4) con tasa de cambio negativa de 0.78%. Este valor de PPN es característico de regiones climáticas áridas (E) y semiáridas secas (D1) y moderadas (D2). El rango de PPN entre 500 y 1,000 g m⁻² año⁻¹ tuvo un ligero incremento a lo largo del periodo estudiado con una tasa positiva de 1.33% en promedio (Figura 4).

En lo que se refiere al rango de PPN promedio anual entre 1000 y 1500 g m⁻² año⁻¹ presentó una tasa de cambio positiva de 2.23% en el periodo estudiado (Figura 4). Mientras que los rangos de PPN promedio anual mayores de 1500 g m⁻² año⁻¹ presentaron incrementos en superficie y tasas de cambio positivas mayores de 2.5% (Figura 4).

Métricas: productividad de la tierra

Se identificaron tres categorías en la métrica de tendencia: estable, mejora o decremento. La tendencia estable se encontró en 86% del territorio nacional,



Nota: A = Región climática muy húmeda; B= Región climática húmeda; C2= Región climática subhúmeda húmeda; C1= Región climática subhúmeda seca; D3= Región climática semiárida húmeda; D2= Región climática semiárida moderada; D1= Región climática semiárida seca; E= Región climática árida.

Figura 3. a) promedio de la Productividad primaria neta (PPN) en la serie temporal 2000-2019 para la República Mexicana; b) valores promedio de máxima y mínima PPN por región climática de México, c) porcentaje del total de la superficie terrestre del promedio anual de la PPN por región climática dominante. Fuente: elaboración propia con imágenes de Terra/MODIS (Didan, 2021).

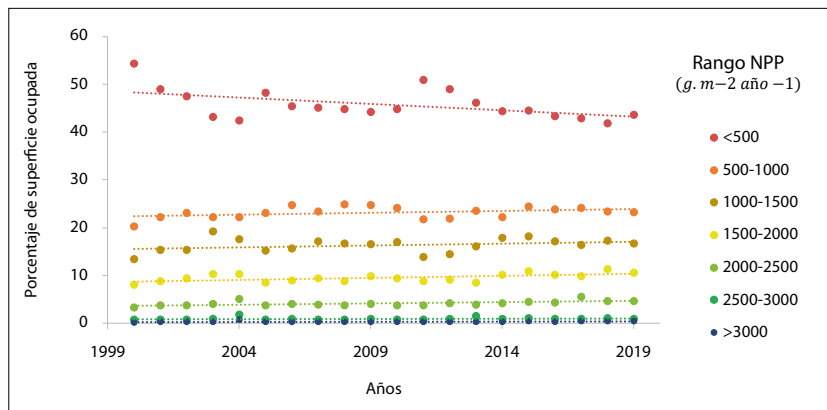


Figura 4. Porcentaje de la superficie nacional ocupada según rangos de Productividad Primaria Neta (PPN).

mejora en 9.6% y con decremento de productividad 3.95% del total del territorio nacional (Figura 5a y Cuadro 1). Resaltaron los decrementos de PT en las regiones climáticas semihúmedas y templadas (D3, C1, C2). La mejora en la tendencia de la PT se manifestó principalmente en la región subhúmeda húmeda (C2) y las regiones semiáridas (D3, D2 y D1).

La métrica de estado de la PT presentó condición estable en casi 88% del territorio, mejora en 10.9% y decremento en 1.3% (Figura 5b y Cuadro 1). La condición de mejora tuvo mayor superficie en la región semiárida seca (D1), así como en la zona árida (E). Sin embargo, en estas regiones (E y D1) también se presentó la condición de decremento de la PT, al igual que en las

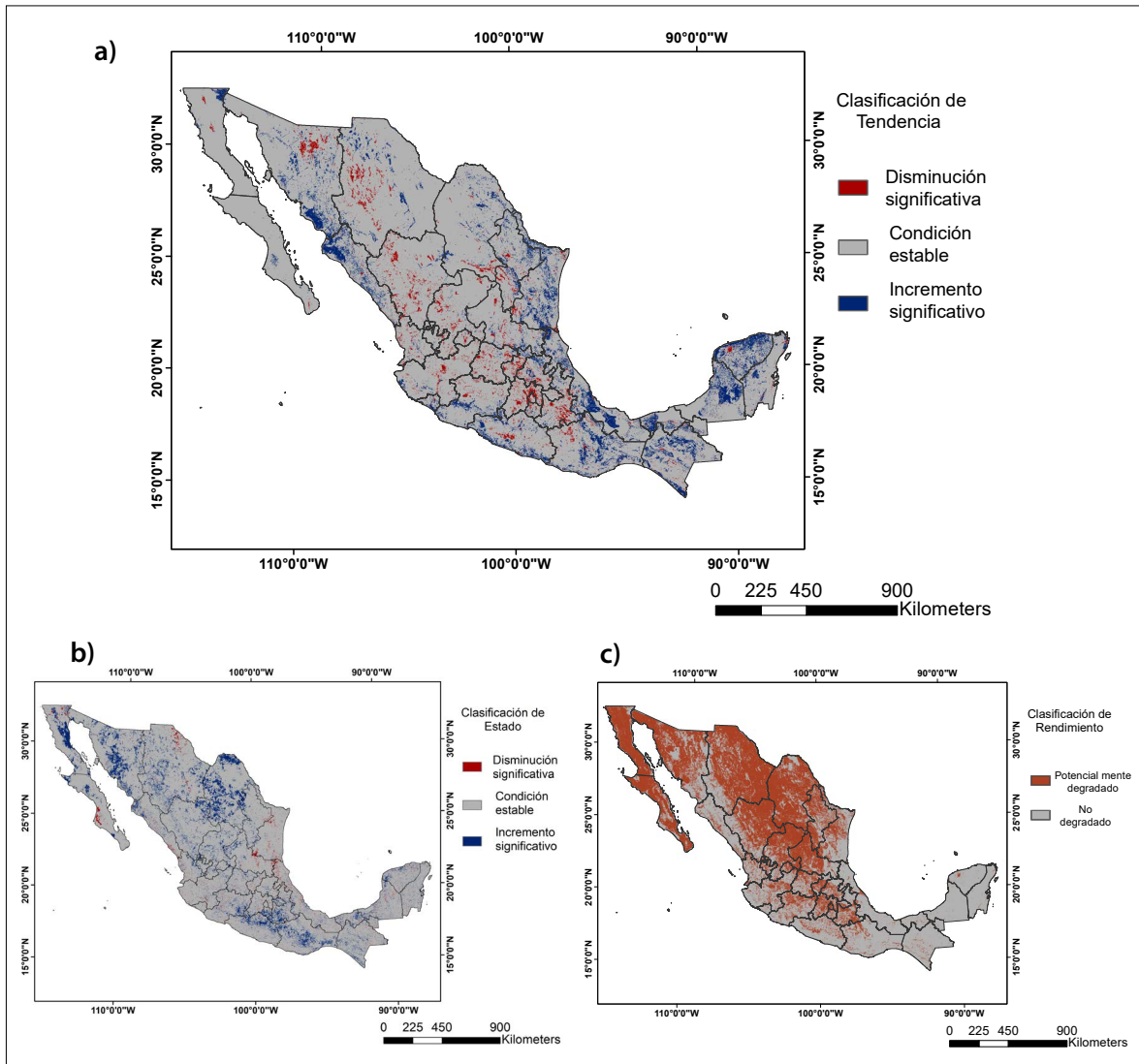


Figura 5. Métricas de productividad de la tierra: a) Valor de Z por año de 2000 a 2019 que muestra la tendencia: con decremento significativo ($Z < -1.28$); estable ($Z = \geq -1.28$ y ≤ 1.28) e incremento significativo ($Z > 1.28$), b) distribución geográfica de tendencia, c) distribución geográfica de estado y d) distribución geográfica de rendimiento. Según dinámica de la productividad primaria neta (PPN) en el periodo 2000-2019. Fuente: elaboración propia con imágenes de Terra/MODIS (Didan, 2021).

Cuadro 1. Superficie (km²) y porcentaje (%) según dinámica de productividad de la tierra (tendencia, estado y rendimiento) y su clasificación (decremento, estable y mejora) por región climática de México.

Región climática	Tendencia de PT			Estado de la PT			Rendimiento	
	Decremento	Estable	Mejora	Decremento	Estable	Mejora	Degradado	No degradado
Superficie (km²)								
Porcentaje del total de la superficie de cada región climática (%)								
E	602.86	228 438.47	13 824.58	5194.24	191 752.74	35 121.10	186 816.52	51 719.76
	0.25 %	94.06 %	5.69 %	0.27%	9.89%	1.81%	9.64%	2.67%
D1	198.67	324 769.55	37 096.67	3383.35	289 533.96	59 700.93	290 801.11	67 555.45
	0.05 %	89.70 %	10.25 %	0.17%	14.94%	3.08%	15.0%	3.49%
D2	5192.26	29 8401.29	35 703.33	4238.67	299 609.60	326 35.59	204 221.87	136 270.94
	1.53 %	87.95 %	10.52 %	0.22%	15.46%	1.68%	10.54%	7.03%
D3	21 449.28	258 309.96	35 185.94	3292.51	281 042.57	31 497.28	128 023.29	188 586.23
	6.81 %	82.02 %	11.17 %	0.17%	14.50%	1.63%	6.61%	9.73%
C1	23 635.45	226 256.92	21 966.94	4012.81	254 684.27	22 248.87	85 585.57	186 502.27
	8.69 %	83.23 %	8.08 %	0.21%	13.14%	1.15%	4.42%	9.62%
C2	9374.40	127 694.27	19 334.76	1963.56	143 530.12	13 777.94	71 653.30	87 445.39
	5.99 %	81.64 %	12.36 %	0.10%	7.41%	0.71%	3.70%	4.51%
B	11 507.26	159 028.34	18 114.45	2698.74	17 9015.66	13 598.82	57 516.82	13 3243.37
	6.10 %	84.30 %	9.60 %	0.14%	9.24%	0.70%	2.97%	6.88%
A	4682.26	51 301.69	5959.10	808.53	61 380.85	3305.99	8191.42	53 895.38
	7.56 %	82.82 %	9.62 %	0.04%	3.17%	0.17%	0.42%	2.78%
Total nacional	76 642.44	1 674 200.49	187 185.77	25 592.40	1 700 549.77	211 886.53	1032 809.91	905 218.79
	3.95 %	86.39 %	9.66 %	1.32%	87.75%	10.93%	53.29%	46.71%

Nota: E= Región climática árida; D1= Región climática semiárida seca; D2= Región climática semiárida moderada; D3=Región climática semiárida húmeda; C1=Región climática subhúmeda seca; C2= Región climática subhúmeda húmeda; B=Región climática húmeda, A=Región climática muy húmeda.

regiones semiárida moderada (D2) y semiárida húmeda (D3).

En lo que se refiere a la métrica de rendimiento de la PT, se observó que 53.2% de la superficie del país tuvo una condición degradada, y 46.7% se clasificó como no degradada (Figura 5b y Cuadro 1). La región climática semiárida seca (D1) tuvo la mayor degradación (15%), y en conjunto, las regiones áridas y semiáridas (E, D1, D2 y D3) significaron 42% de la superficie nacional degra-

dada (Figura 5c y Cuadro 1). La superficie no degradada dominó principalmente en las regiones subhúmeda húmeda (C1), húmeda (B) y muy húmeda (A).

Métrica: dinámica de la productividad de la tierra (DPT)

Se determinaron cinco clases de la dinámica de la productividad de la tierra (DPT) (Figura 6). La clase que tuvo mayor superficie ocupada fue la estable

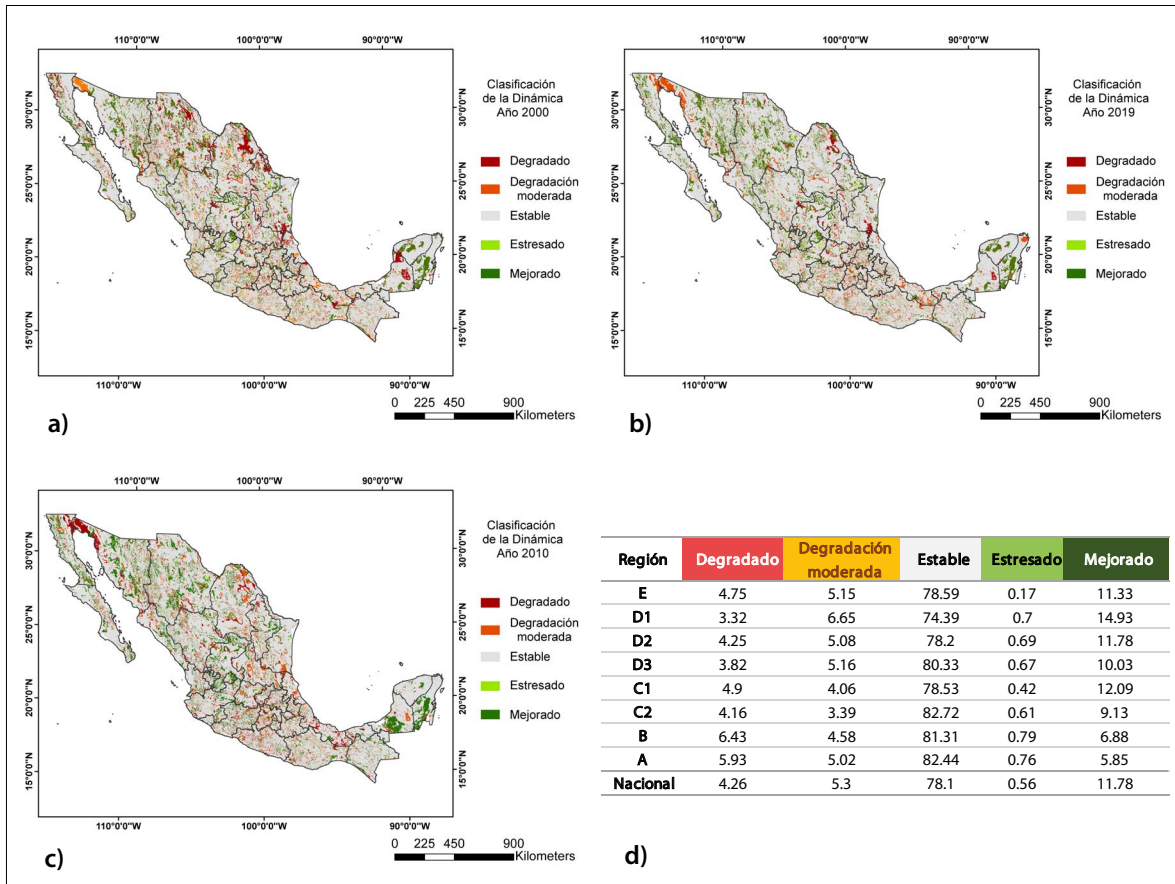


Figura 6. Distribución espacial de las cinco clases de degradación de la dinámica de la productividad de la tierra (DPT) en México para los años a) 2000, b) 2010 y c) 2019; d) porcentaje del total de la superficie terrestre de las cinco clases de degradación de la PT en las ocho regiones climáticas a nivel nacional.

(78%), seguida de mejora (11.78%) y, en menor superficie, las clases degradada (4.26%), degradación moderada (5.3%) y estresada (0.56%).

Prácticamente en todo el país se observó degradación en la DPT. Por grupo climático fue posible identificar que la degradación va desde 7.5% de superficie en climas templados subhúmedos (C2) hasta 11% de superficie de los climas húmedos (A y B). Lo anterior muestra que la mayor degradación ocurrió en climas húmedos, pero en todos los grupos climáticos estuvo presente en casi el 10% de su superficie.

A lo largo de la serie temporal 2000-2019 la clase degradada de la dinámica de la PT aumentó en seis de las ocho regiones climáticas estudiadas. Este incremento en superficie (km²) comenzó a ser gradual a partir del año 2013 (Figura 7). Las

regiones con aumento en la superficie degradada en los últimos seis años de evaluación fueron la árida (e), húmeda (b), subhúmeda seca y húmeda (c1 y c2), así como semiárida moderada y húmeda (D2 y D3) (Anexo 6).

Usos de suelo y productividad de la tierra

En las 20 clases de uso de suelo y vegetación consideradas predominó la condición de estabilidad en la dinámica de PT. Es decir, en poco más de 70% de la superficie ocupada por tipo de uso de suelo y vegetación no hubo cambios considerables. Sin embargo, se encontró también que las 20 clases de uso de suelo y vegetación estuvieron expuestas a degradación y degradación moderada de la dinámica de la PT. Lo anterior al considerar toda la serie

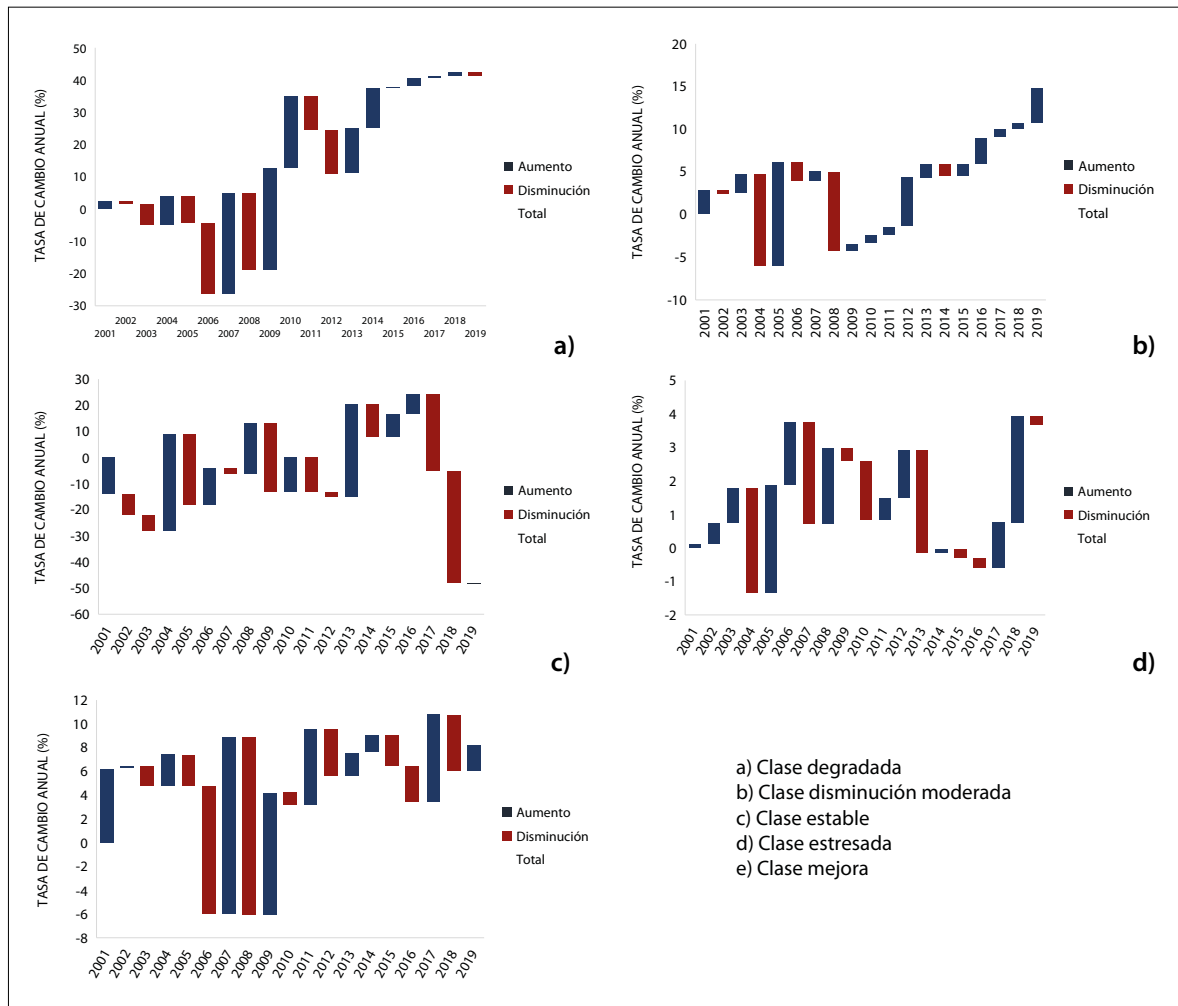


Figura 7. Dinámica de cambio anual en porcentaje de las cinco clases de degradación de la productividad de la tierra (PT) en la serie temporal 2000-2019 en México. a) degradación; b) degradación moderada; c) estable, d) estresada y e) mejora.

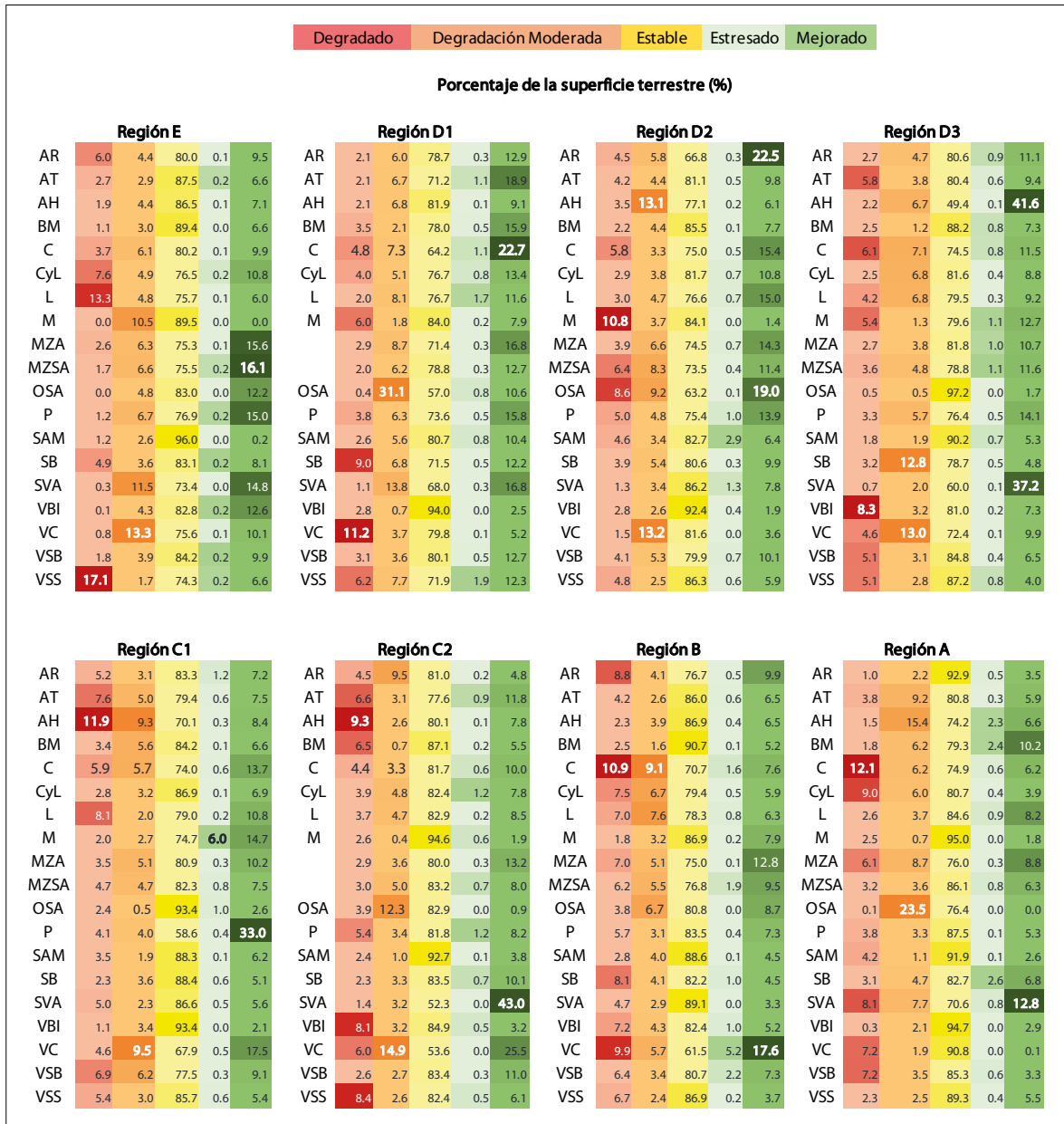
temporal 2000 a 2019. La vegetación más expuesta se identificó en los bosques de coníferas (regiones climáticas húmedas B y A), en vegetación costera (regiones climáticas subhúmedas C2 y semiáridas D3), en asentamientos humanos (región climática subhúmedas C1), vegetación secundaria de climas áridos (región E) y otras superficies arboladas (principalmente en regiones climáticas semiáridas (D1 y D2) (Figura 8).

A pesar de que las 20 clases de usos de suelo y vegetación estuvieron expuestas a la degradación y degradación moderada de la dinámica de la PT, se observó que, en todas ellas, estuvo presente

la clase de mejora de la dinámica de la PT, principalmente en las áreas sin vegetación aparente (SVA) y otras superficies arboladas (OSA). La clase estresada no tuvo suficiente representatividad en ningún uso de suelo y vegetación de las ocho regiones climáticas.

DISCUSIÓN

La variación de la PPN que se encontró en las ocho regiones climáticas se debe a que los ciclos de la PPN presentan fases a lo largo del tiempo,



Nota: AR= Agricultura de riego ; AT= Agricultura de temporal; AH= Asentamientos Humanos; BM= Bosque Mesófilo de Montaña; C= Bosque de Coníferas; CyL= Bosque de Coníferas y Latifoliadas; L= Latifoliadas; M= Manglares; MZA= Matorrales y Chaparrales de Zonas Áridas; MZSA= Matorrales y Chaparrales de Zonas Semiáridas; OSA= Otras áreas arboladas; P= Pastizales; SAM= Selvas altas y medianas; SB= Selvas bajas; SVA= Sin vegetación Aparente; VBI= Vegetación Baja Inundable; VC= Vegetación Costera; VS= Vegetación Secundaria de Bosque, VSS= Vegetación Secundaria de Selva.

Figura 8. Matriz de análisis del porcentaje de la superficie terrestre de las 20 clases de usos de suelo y vegetación expuesto a las cinco categorías del estado de la dinámica de la PT en las ocho regiones climáticas evaluadas.

que ocasionan que la PPN varíe estacionalmente con el crecimiento anual y ciclos fenológicos de la biomasa en pie, presente en cada región (Wang *et al.*, 2021). Además de que la biomasa en pie tiene una relación directa con el clima, la energía solar recibida (Kamali *et al.*, 2020), así como con los nutrientes y humedad disponibles en el suelo (Cory *et al.*, 2011) y el relieve del terreno, que influyen directamente en la PPN y, por ende, en la dinámica de la productividad de la tierra (Ivits *et al.*, 2013).

La predominancia de la superficie de PPN menor a $500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ que se determinó en las regiones con clima árido y semiárido, se debió a que la vegetación dominante es de chaparrales y matorrales asociados a pastizales. Estos tipos de vegetación tienen la característica de producir bajas cantidades de biomasa en pie, ya que están en función de la precipitación anual (aproximadamente 200 mm), su intensidad, frecuencia y estacionalidad, la infiltración y escurrimiento del agua de lluvia, evaporación, temperatura, fertilidad del suelo, topografía, densidad y composición de la vegetación y potencial de producción de las especies que se presenta en las zonas áridas y otras tierras secas (Gupta y Oza., 2021; Briones *et al.*, 2018; Mares, 2017). Los resultados de esta investigación coinciden con CONAFOR-UACH (2013) que reportaron que la PPN en las regiones áridas de México puede variar entre $100 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ a $160 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en las regiones más áridas, hasta $340 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ a $960 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en la porción sur y regiones colindantes con montañas de las zonas áridas Chihuahuense y Poblana. En contraste, en las regiones húmedas y muy húmedas, la PPN que se encontró en esta investigación fue mayor a $1000 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, gracias a que la biomasa en pie que dominó en esas regiones fue de bosques y selvas. Estos resultados fueron similares a los que encontraron Chávez-Aguilar *et al.* (2023) en los bosques del Cinturón Volcánico Transversal, donde la PPN oscila entre 1430 a $1470 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, mientras que, de acuerdo con Álvarez-Sánchez (1991), la selva alta perennifolia de Los Tuxtlas, Veracruz, tiene una PPN de hasta $1620 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, similar a lo que se encontró en esta investigación.

La disminución gradual de la superficie de PPN menor a $500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ a lo largo de la serie

temporal 2000-2019, se pudo deber al cambio de uso del suelo y vegetación. De acuerdo con el último informe nacional de acciones contra la desertificación, degradación de tierras y sequía en México, se encontró que, en las regiones áridas y semiáridas, los chaparrales y matorrales tuvieron pérdidas anuales de 2566.84 km^2 entre el periodo 2000-2015, además de que se registró que la superficie de los chaparrales y matorrales está cambiando a pastizales y tierras de cultivo (CONAZA-UACH, 2023). Esto pudo dar pauta al incremento de la PPN con rangos mayores a $500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ que se registraron en este estudio. Este incremento de la PPN coincide con lo que encontraron Potter *et al.* (2012) quienes observaron un ligero aumento de la PPN en el periodo de tiempo 2000-2009 en las regiones del hemisferio norte de latitudes altas.

El ligero incremento de la PPN que se presentó en las regiones áridas y semiáridas se pudo deber a los cambios en la cobertura y uso del suelo hacia pastizales y cultivos agrícolas altamente productivos que requieren riego para su desarrollo (CONAZA-UACH, 2023). Esto puede conducir a impactos negativos en la conservación de la biodiversidad, suelo y servicios ecosistémicos de las zonas áridas y otras tierras secas, al cambiar la vegetación nativa por pastizales introducidos (De la Fuente *et al.*, 2020; Bradford *et al.*, 2005).

La prevalencia de la condición estable de la métrica de tendencia y estado de la dinámica de la PT, en más de 80% de la superficie nacional, nos indica que, bajo esa condición, no hubo cambios significativos en la productividad a largo plazo, y que la productividad de los últimos cuatro años del periodo de evaluación (2015-2019) fue similar a la productividad histórica (2000-2014) (Cherlet *et al.*, 2018). Estos resultados fueron similares a los datos globales que reportó la UNCCD (2017) en el periodo 1999-2013, donde la condición estable en la tendencia y estado de la productividad fue mayor que la disminución e incremento de la PT.

La degradación de la métrica de rendimiento que se manifestó en más de 50% del territorio nacional se debió a la dominancia del tipo de vegetación de chaparrales y matorrales asociado a pastizales en las regiones áridas y semiáridas de Mé-

xico, donde la PPN fue menor a $500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, la cual está relacionada con la métrica de rendimiento (Bao *et al.*, 2016).

Los resultados de la combinación de las tres métricas (tendencia, estado y rendimiento) que dieron lugar a las cinco clases de degradación de la dinámica de la PT, coincidieron con lo que reportaron Dengiz *et al.* (2018) en ecosistemas subhúmedos de Turquía para el periodo 2001-2015, Shen *et al.* (2023) en diversos países de África en el periodo de tiempo 2013-2020, así como de la Fuente *et al.* (2020), quienes determinaron la dinámica de la PT a nivel global en la serie temporal 1999-2013. En dichas investigaciones predominó la clase estable de la PT, además de que existió mayor superficie con mejora que con clases de degradación moderada y degradada de la dinámica de la PT.

La dominancia de la clase estable de la PT en todas las regiones climáticas que se evaluaron se debe a que, de acuerdo con lo que reportó CONAZA-UACH (2023), no hubo cambios significativos en el uso del suelo y vegetación en 85% de la superficie terrestre de México en el periodo 2000-2015, mientras que en el periodo 2015-2019 la superficie con cambios en el uso de suelo y vegetación fue de 3%. Esto podría explicar la permanencia de la condición estable de la dinámica de la productividad de la tierra, determinada en este estudio. Sin embargo, es posible que la condición estable de la PT se deba a una combinación de factores socioambientales, tales como el manejo del sistema, políticas ambientales, clima y fisiografía, por mencionar algunos, que permiten que la productividad de la tierra se mantenga estable (Rotllan-Puig *et al.*, 2021).

La superficie con clase mejorada de la PT se pudo deber a políticas de reforestación y protección que ha impulsado el gobierno de México desde principios del siglo XXI (CONAFOR, 2019), principalmente en áreas sin vegetación aparente y otras superficies arboladas, tal como se detectó en este estudio. Sin embargo, también podría estar influenciada por políticas públicas que impulsan un mayor manejo tecnológico de pastizales y tierras de cultivo, que incluye fertirrigación y uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, que impulsa la sobreexplotación del suelo (Bonilla y Mitchel, 2020; Baskan *et al.*, 2017).

A pesar de que la clase estable y con mejora de la PT dominan gran parte del territorio nacional, en este estudio se detectó que todos los usos de suelo y vegetación tuvieron superficies con algún grado de degradación de la PT. Además de que está incrementando la superficie con la clase degradada de la PT. Esto se puede deber a que en México la dinámica de cambio de uso del suelo y vegetación ha seguido un patrón que favorece el crecimiento de zonas urbanas, áreas de cultivo, así como de pastizales inducidos (CONAZA-UACH, 2023).

Los bosques de coníferas, ubicados principalmente en las regiones templadas húmedas y muy húmedas de México, fueron los que tuvieron mayor superficie degradada en comparación con los otros usos de suelo y vegetación, tal como lo reportó Bonilla y Mitchel (2020) en un estudio realizado en 40 ecorregiones de México para el periodo 2001-2014. Esto se puede deber a que, en México, de acuerdo con la CONAFOR (2023), alrededor de 80% de los bosques y selvas se encuentran con procesos de degradación forestal y baja gobernabilidad, bajo régimen de propiedad social que incluye a ejidos y comunidades con alta marginación, las cuales utilizan los recursos forestales para sus necesidades básicas, y en ocasiones, generan la sobreexplotación de los bosques y selvas. Aunado a ello, está la variabilidad climática, plagas y enfermedades forestales, los incendios forestales, la fragmentación de ecosistemas forestales, el crecimiento de la frontera agrícola y urbana, así como problemas sociales y políticos (Bonilla y Mitchel, 2020; Kamali *et al.*, 2020), que podrían conducir a la degradación continua de la productividad de la tierra. Es necesario reconocer que, en este estudio, no fue posible analizar los factores que detonan la degradación de la PT, sin embargo, es necesario que se retome en futuras investigaciones.

En las cinco clases de dinámica de PT se observó una tasa de cambio variada entre los años de la serie temporal 2000-2019. Esto se podría explicar debido a que la productividad de la tierra suele ser muy variable a través de los años y en distintos ciclos de crecimiento vegetativo (Ivits *et al.*, 2013), además de que está en función de la adaptación natural a diferentes eventos meteorológicos extremos (sequías, lluvias torrenciales, granizadas, heladas, etc.) y al ma-

nejo inducido por el hombre (Rotllan et al., 2021). Por lo que, la productividad de la tierra adopta un equilibrio dinámico en lugar de una continuidad lineal (Cherlet et al., 2018). Por lo tanto, no debe analizarse para años aislados de referencia o promedios de unos pocos años (Shen et al., 2023), sino a través de un análisis multitemporal en una serie de tiempo prolongada que permita el monitoreo de la dinámica de la productividad de la tierra (Zhang et al., 2021), tal como se realizó en este estudio.

CONCLUSIÓN

Fue posible cuantificar el indicador de productividad de la tierra (PT) a escala nacional en México mediante la determinación de la dinámica de la productividad de la tierra (DPT) propuesta en el *Atlas Mundial de la Desertificación*, para el periodo 2000-2019, considerando la diversidad climática y de cobertura vegetal del país, tal como se planteó en el objetivo de la investigación. Los resultados obtenidos contribuyen a tener información cuantitativa del indicador de productividad de la tierra, que puede ser de utilidad para futuras investigaciones que midan la degradación y desertificación de tierras en México, tomando en cuenta los nuevos criterios e indicadores (cambio en la cubierta terrestre, productividad de la tierra y carbono orgánico del suelo) establecidos por la UNCCD.

Se obtuvo la prevalencia de la clase estable de la dinámica de la PT, seguida de la clase con mejora, en las ocho regiones climáticas de México. Sin embargo, la superficie con algún grado de degradación aumentó en los diferentes usos del suelo y vegetación de México en la serie temporal 2000-2019. Se requieren futuras investigaciones que analicen los factores que mantienen la clase estable y mejorada de la PT, o que detonan la degradación de la productividad de la tierra.

En este estudio queda claro que la productividad de la tierra tiene variación de una región climática a otra, además de que es dinámica a través de los años, por lo que el uso del análisis multitemporal se requiere para monitorear la productividad de la tierra a través del tiempo. Esto permite tener información sólida necesaria en la

toma de decisiones para la conservación y mejora de la productividad de la tierra y disminución de la degradación y desertificación de tierras en México.

REFERENCIAS

- Álvarez-Sánchez, J. (1991). Productividad primaria neta en una selva húmeda. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (51), 3-12. <https://doi.org/10.17129/botsci.1393>
- Bao, G., Bao, Y., Qin, Z., Xin, X., Bao, Y., Bayarsaikhan, S., Zhou, Y., Chuntai, B. (2016). Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, (46), 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.001>.
- Baskan, O., Dengiz, O. y Demirag, İ. T. (2017). The land productivity dynamics trend as a tool for land degradation assessment in a dryland ecosystem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189-212. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5909-3>
- Bernard, B., Mwanjalolo, M. J. G., Moses, B., James, K., Paul, M., Ojoatre, S., Lydia, W. y Walusimbi, M. N. (2022). A Simplified Spatial Methodology for Assessing Land Productivity Status in Africa. *Land*, 730. <https://doi.org/10.3390/land11050730>.
- Bonilla-Moheno, M. y Aide, T.M. (2020). Beyond deforestation: Land cover transitions in Mexico. *Agricultural Systems*, 102734. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102734>
- Bradford J. B., Lauenroth W. K. y Burke I. C., (2005). The impact of cropping on primary production in the US Great Plains. *Ecology*, 1863-1872. <https://doi.org/10.1890/04-0493>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., y Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y bosques*, (24), e2401898. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Chávez-Aguilar, G., Pérez-Suárez, M., Gayosso-Barragán, O., López-López, M. A., y Ángeles-Pérez, G. (2023). Forest management accelerates aboveground biomass accumulation in a temperate forest of Central Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(1), 15-33. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.03.014>
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer S. y von Maltitz, G. (2018). *World Atlas of Desertification: rethinking land degradation and sustainable land management*. Publication Office

- of the European Union. Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/9205>
- Cleveland, C.C., Townsend, R.A., Taylor, P., Alvarez-Clares, S., Bustamante, M. M. C., Chuyong, G., Dobrowski, S. Z., Grierson, P., Harms, K. E., Houlton, B. Z., Marklein, A., Parton, W., Porder, S., Reed, S. C., Sierra, C. A., Silver, W. L., Tanner, E. V. J. y Wieder, W. R. (2011). Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: a pan-tropical analysis. *Ecology letters*, 14(9), 939-947. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01658.x>
- CONAFOR. (2019). *Programas y apoyos*. Obtenido de <https://snif.cnf.gob.mx/programas-y-apoyos/>.
- CONAFOR-UACH. (2013). *Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe Final*. SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/linea-base-nacional-degradacion-de-tierras-y-desertificacion-parte-1>
- CONAFOR-UACH. (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación*. Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma de Chapingo. Zapopan, Jalisco.
- CONAZA-UACH. (2003). *Escenarios Climatológicos de la República Mexicana ante el Cambio Climático*. Comisión Nacional de las Zonas Áridas y Universidad Autónoma Chapingo. Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA) y Universidad Autónoma Chapingo (UACH). https://www.researchgate.net/publication/272180250_Escenarios_climatologicos_de_la_Republica_Mexicana_ante_el_cambio_climatico
- CONAZA-UACH. (2023). *Informe nacional 2022 de acciones contra la desertificación, degradación de tierras y sequía en México*. Comisión Nacional de Zonas Áridas. https://www.researchgate.net/publication/374673915_Resumen_Ejecutivo_Informe_Nacional_Mexico_2022_de_Degradacion_de_Tierras_Desertificacion_y_Sequia
- Cui, Y. y Li, X. (2022). A New Global Land Productivity Dynamic Product Based on the Consistency of Various Vegetation Biophysical Indicators. *Big Earth Data*, 6(1), 36-53. <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.2018789>
- de la Fuente B, Weynants, M., Bertzky, B., Delli, G., Mandrici, A., García, B. E y Dubois, G. (2020). Land productivity dynamics in and around protected areas globally from 1999 to 2013. *PLoS ONE*, e0224958. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224958>.
- Dengiz, O. (2018). Potential impact of land use change on land productivity dynamics with focus on land degradation in a sub-humid terrestrial ecosystem. *Theoretical and Applied Climatology*, (133), 73-88. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2162-1>.
- Didan, K. (2021). *MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061 [Data set]*. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Obtenido de <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>
- FAO. (2022). *Overview of Land Degradation Neutrality (LDN) in Europe and Central Asia*. Food and Agriculture Organization. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7986en>
- Field, C.B., Randerson, J.T. y Malmström, C. M. (1995). Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51(1), 74-88. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00066-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00066-V).
- Garbulsky, M. F., Peñuelas, J., Papale, D., Ardö, J., Goulden, M. L., Kiely, G., Richardso, A. D., Rotenberg, E., Veenendaal, E. M. y Filella, I. (2010). Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 19(2), 253-267. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00504.x>.
- Gómez-Díaz, J., y Monterroso-Rivas, A. (2012). *Actualización de la delimitación de las zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas de México a escala regional. Reporte final de proyecto de investigación*. Fondo SEMARNAT-CONACYT. Universidad Autónoma Chapingo.
- Gupta, U. K. y Oza, M. P. (2021). An Approach to Land Productivity Dynamics Assessment: A Case Study of Rajasthan Region, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, (49), 2187-2198. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01381-y>.
- INEGI. (1997). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie II. Conjunto Nacional*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825650483>
- INEGI. (2016). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Conjunto Nacional*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>
- INEGI. (2018). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>
- Ivits, E. y Cherlet, M. (2013). *Land-productivity dynamics towards integrated assessment of land degradation at global scales (Technical Report No. EUR 26052)*. Joint Research Centre of the European Commission. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/59315>
- Kamali, A., Khosravi, M., Hamidianpour, M. (2020). Análisis espacio-temporal de la producción primaria neta (PPN) y su relación con los factores climáticos en Irán. *Environmental Monitoring Assessment*, (192), 718. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08667-7>.

- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. Charles Griffin.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, (13), 245-259.
- Mares, M. A. (2017). *Encyclopedia of deserts*. University of Oklahoma Press.
- Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747-766. <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Monterroso-Rivas, A. I. y Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana*, (39), 1-19. e774. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>
- Potter, C., Klooster, S. y Genovese, V. (2012). Net primary production of terrestrial ecosystems from 2000 to 2009. *Climatic Change*, (115), 365-378. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0460-2>
- Rotllán-Puig, X., Ivits, E. y Cherlet, M. (2021). LPDynR: A New Tool to Calculate the Land Productivity Dynamics Indicator. *Ecological Indicators*, (133), 108386. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108386>
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Llorente-Bousquets, J., Halffter, G., González, R., March, I., Mohar, A., Anta, S., Maza, J., Pisanty, I., Urquiza, H.T., Ruiz, G.S. y García, M.G. (2017). *Capital natural de México. Síntesis: evaluación del conocimiento y tendencias de cambio, perspectivas de sustentabilidad, capacidades humanas e institucionales*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/capitalNatMex.html>
- SEMARNAT. (2012). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental*. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/03_suelos/cap3_2.html
- SEMARNAT-CP. (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000*. Memoria Nacional 2001-2002.
- Shen, T., Li, X., Chen, Y., Cui, Y., Lu, Q., Jia, X. y Chen, J. (2023). HiLPD-GEE: high spatial resolution land productivity dynamics calculation tool using Landsat and MODIS data. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 671-690. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2179675>
- Sims, N. C., Newnham, G. J., England, J. R., Guerschman, J., Cox, S. J. D., Roxburgh, S. H., Viscarra Rossel, R. A., Fritz, S., y Wheeler, I. (2021). *Good practice guidance. SDG Indicator 15.3.1, Proportion of Land That Is Degraded Over Total Land Area. Version 2.0*. United Nations Convention to Combat Desertification. https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2021-03/Indicator_15.3.1_GPG_v2_29Mar_Advanced-version.pdf
- UNCCD. (2022). *Report of the Conference of the Parties on its Fifteenth Session, Held in Abidjan, Côte D'Ivoire, from 9 to 20 May 2022. Part Two: Action Taken by the Conference of the Parties at its Fifteenth Session*. United Nations Convention to Combat Desertification. https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-09/ICCD_COP%2815%29_23-2209459S.pdf
- Wang, S., Zhang, Y., Ju, W., Qiu, B., Zhang, Z. (2021). Tracking the seasonal and inter-annual variations of global gross primary production during last four decades using satellite near-infrared reflectance data. *Science of The Total Environment*, (755) part 2), 142569, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142569>
- Zhang Y, Hu Q, Zou F. (2021). Spatio-Temporal Changes of Vegetation Net Primary Productivity and Its Driving Factors on the Qinghai-Tibetan Plateau from 2001 to 2017. *Remote Sensing*, 13(8), 1566. <https://doi.org/10.3390/rs13081566>

ANEXO 1

Rango del periodo de crecimiento y promedio (días) en cada una de las regiones climáticas de México propuestas en CONAZA-UACH (2003).

Símbolo	Tipo climático	Rango de PECRE (días)	Promedio de PECRE (días)
E	Árido	44-90	67
D1	Semiárido seco	45-121	83
D2	Semiárido moderado	64-127	96
D3	Semiárido húmedo	91-204	148
C1	Subhúmedo seco	109-217	163
C2	Subhúmedo húmedo	128-294	211
B	Húmedo	215-355	285
A	Muy Húmedo	299-365	332

Fuente: Monterroso y Gómez (2021)

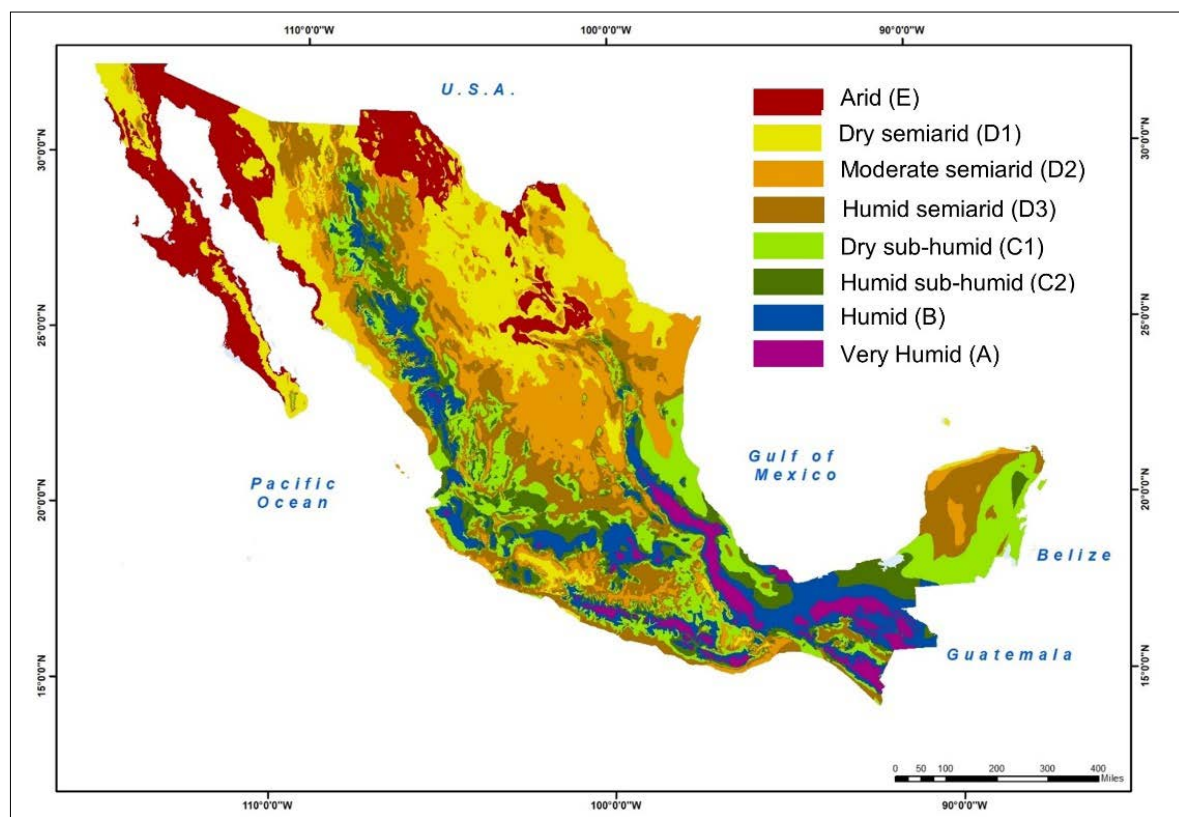


Figura A.1 Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de México de acuerdo con CONAZA-UACH (2003).

Cuadro A.1. Características de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de México.

Símbolo	Tipo climático	Periodo de lluvias	Ppr anual (mm)		T°C media anual	EPT potencial anual (mm)	Cobertura vegetal predominante	Superficie %
			N	S				
E	Árido	Menor a 3 meses	250	-----	18 a 29	800 a 1900	Chaparrales, pastizales y matorrales	12
D1	Semiárido seco	3 meses	200	400	16 a 28	700 a 1800	Chaparrales, pastizales, matorrales y selva baja caducifolia	16
D2	Semiárido moderado	3 a 4 meses	350	700	16 a 28	700 a 1800	Chaparrales, pastizales, matorrales, selva baja caducifolia y selva mediana caducifolia	17
D3	Semiárido húmedo	3 a 5 meses	400	800	14 a 28	600 a 1700	Chaparral, pastizal, matorral, selva baja y media caducifolia, pequeñas zonas de bosque mesófilo	16
C1	Subhúmedo seco	4 a 5 meses	500	900	13 a 26	600 a 1600	Pastizales, selvas bajas y medianas caducifolias, bosques	14
C2	Subhúmedo húmedo	4 a 6 meses	700	1100	11 a 25	600 a 1500	Bosque y selva mediana caducifolia	8
B	Húmedo	5 meses	800	1300	9 a 25	500 a 1500	Bosque, selva mediana caducifolia, selva mediana y alta perennifolia	10
A	Muy húmedo	6 meses	1500	2500	4 a 24	400 a 1500	Bosque, selva media y alta caducifolia y perennifolia	3

Ppt= precipitación anual (mm); T °C= Temperatura media anual; ETP= Evapotranspiración potencial anual (mm); N= Zona norte de México; S= Zona sur de México.

Fuente: elaboración propia con datos de CONAZA-UACH (2003)

ANEXO 2

Datos mensuales de radiación solar extraterrestre (RA) (MJ x m-2 x día-1) por latitud.

Latitud	E	F	M	A	My	J	Jl	Ag	S	O	N	D
31	8.57	10.46	12.96	15.09	16.52	16.99	16.77	15.63	13.77	11.41	9.24	8.04
29	9.05	10.89	13.27	15.22	16.51	16.89	16.73	15.7	13.99	11.78	9.7	8.55
27	9.54	11.3	13.52	15.3	16.46	16.77	16.63	15.73	14.17	12.13	10.11	9.03
25	10	11.7	13.78	15.39	16.4	16.65	16.53	15.76	14.36	12.47	10.51	9.5
23	10.45	12.1	14.03	15.47	16.35	16.53	16.42	15.8	14.55	12.81	10.91	9.97
21	10.95	12.51	14.29	15.56	16.3	16.42	16.32	15.83	14.74	13.15	11.36	10.44
19	11.4	12.87	14.51	15.61	16.19	16.25	16.18	15.82	14.89	13.45	11.82	10.9
17	11.8	13.17	14.65	15.63	16.05	16.03	16	15.76	14.99	13.72	12.23	11.35
15	12.21	13.47	14.79	15.65	15.91	15.81	15.82	15.69	15.09	13.99	12.64	11.8

Fuente: Ortiz y Huertas (1993).

ANEXO 3

Datos mensuales de insolación máxima (N) (h x día-1) por latitud.

Latitud	E	F	M	A	My	J	Jl	Ag	S	O	N	D
31	10.30	11.10	12.00	12.90	13.70	14.10	14.00	13.30	12.40	11.50	10.50	10.10
29	10.50	11.10	12.00	12.90	13.50	13.90	13.80	13.20	12.40	11.50	10.70	10.30
27	10.60	11.20	12.00	12.80	13.40	13.80	13.70	13.10	12.30	11.60	10.80	10.40
25	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
23	10.80	11.40	12.00	12.70	13.20	13.60	13.40	12.90	12.30	11.60	11.00	10.70
21	10.90	11.50	12.00	12.60	13.10	13.40	13.30	12.80	12.30	11.70	11.10	10.80
19	11.10	11.50	12.00	12.60	13.00	13.20	13.10	12.80	12.30	11.70	11.20	11.00
17	11.20	11.60	12.00	12.50	12.90	13.10	13.00	12.70	12.20	11.80	11.40	11.10

Fuente: Ortiz y Huertas (1993).

ANEXO 4

Valores de la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) (Gms MJ-1) por uso de suelo y vegetación.

Uso de suelo y vegetación	EUR (gMs MJ-1)	Uso de suelo y vegetación	EUR (gMs MJ-1)
Bosque lluvioso	3.10	Bosque tropical seco	1.09
Bosque templado caducifolio	2.20	Vegetación de zonas áridas	0.32
Bosque templado perennifolio	2.13	Cultivos anuales	2.46
Bosque mixto	1.86	Pastizales	2.10
Bosque tropical perennifolio	1.7		

Fuente: elaboración propia con datos de Garbulsky et al. (2010) y Field *et al.* (1995)

ANEXO 5

Clasificación de los usos de suelo y vegetación reportados por Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).

Clasificación Propuesta	Tipos de vegetación según INEGI
Coníferas	Bosque de ayarín, bosque de cedro, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de táscate, vegetación secundaria arbórea de bosque de Ayarín, vegetación secundaria arbórea de bosque de oyamel, vegetación secundaria arbórea de bosque de pino, vegetación secundaria arbórea de bosque de táscate.
Coníferas y latifoliadas	Bosque de encino-pino, bosque de galería, vegetación de galería, vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino, vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino.
Latifoliadas	Bosque bajo abierto, bosque de encino, vegetación secundaria arbórea de bosque bajo abierto, vegetación secundaria arbórea de bosque de encino.
Bosque mesófilo	Bosque mesófilo.
Selvas altas y medianas	Selva alta perennifolia, selva alta subperennifolia, selva de galería, selva mediana caducifolia, selva mediana perennifolia, selva mediana subperennifolia, vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia, vegetación secundaria arbórea de selva alta subperennifolia, vegetación secundaria arbórea de selva mediana caducifolia, vegetación secundaria arbórea de selva mediana perennifolia, vegetación secundaria arbórea de selva mediana subcaducifolia, vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia.
Selvas bajas	Selva baja caducifolia, selva baja espinosa, selva baja perennifolia, selva baja subcaducifolia, selva baja subperennifolia, vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia, vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa, vegetación secundaria arbórea de selva baja perennifolia, vegetación secundaria arbórea de selva baja subcaducifolia, vegetación secundaria arbórea de selva baja subperennifolia.
Otras superficies arboladas	Vegetación secundaria arbórea de mezquital, palmar, vegetación secundaria de palmar.
Matorral de zonas áridas	Matorral crasicaule, vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule, vegetación secundaria herbácea de matorral crasicaule, matorral desértico micrófilo, vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo, vegetación secundaria herbácea de matorral desértico micrófilo, matorral desértico rosetófilo, vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico rosetófilo, matorral rosetófilo costero, vegetación secundaria arbustiva de matorral rosetófilo costero, vegetación secundaria herbácea de matorral rosetófilo costero.
Matorral de zonas semiáridas	Matorral espinoso tamaulipeco, vegetación secundaria arbustiva de matorral espinoso tamaulipeco, vegetación secundaria herbácea de matorral espinoso tamaulipeco, matorral sarco-crasicaule, vegetación secundaria arbustiva de matorral sarco-crasicaule, matorral sarco-crasicaule de neblina, vegetación secundaria arbustiva de matorral sarco-crasicaule de neblina, matorral sarcocaule, vegetación secundaria arbustiva de matorral sarcocaule, matorral submontano, vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano, matorral subtropical, vegetación secundaria arbustiva de matorral subtropical, chaparral, vegetación secundaria arbustiva de chaparral, vegetación herbácea de chaparral, Huizachal, vegetación secundaria arbustiva de Huizachal, matorral de coníferas, mezquital, vegetación secundaria arbustiva de mezquital.
Pastizales	Sabana, pastizal-Huizachal, vegetación secundaria arbustiva de pastizal-Huizachal, pastizal cultivado, pastizal gipsófilo, vegetación secundaria arbustiva de pastizal gipsófilo, pastizal halófilo, vegetación secundaria arbustiva de pastizal halófilo, pastizal inducido, pastizal natural, vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural, pradera de alta montaña
Vegetación costera	Vegetación de dunas costeras, vegetación gipsófila, vegetación halófila, vegetación secundaria arbustiva de vegetación halófila, vegetación secundaria herbácea de vegetación halófila.

Clasificación Propuesta	Tipos de vegetación según INEGI
Vegetación secundaria de bosques	Vegetación secundaria arbustiva de bosque bajo abierto, vegetación secundaria arbustiva de bosque de Ayarín, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, vegetación secundaria herbácea de bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino, vegetación secundaria herbácea de bosque de pino-encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de galería, vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel, vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino, vegetación secundaria herbácea de bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino, vegetación secundaria herbácea de bosque de pino-encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate, vegetación secundaria herbácea de bosque de táscate, vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña, vegetación secundaria herbácea de bosque mesófilo de montaña.
Vegetación secundaria de selvas	Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia, vegetación secundaria herbácea de selva alta perennifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva alta subperennifolia, vegetación secundaria herbácea de selva alta subperennifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva alta caducifolia, vegetación secundaria herbácea de selva alta caducifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia, vegetación secundaria herbácea de selva baja caducifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa, vegetación secundaria herbácea de selva baja espinosa, vegetación secundaria arbustiva de selva baja perennifolia, vegetación secundaria herbácea de selva baja perennifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva baja subcaducifolia, vegetación secundaria herbácea de selva baja subcaducifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva baja subperennifolia, vegetación secundaria herbácea de selva baja subperennifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva mediana caducifolia, vegetación secundaria herbácea de selva mediana caducifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subcaducifolia, vegetación secundaria herbácea de selva mediana subcaducifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia, vegetación secundaria herbácea de selva mediana subperennifolia.
Manglar	Manglar, vegetación secundaria arbórea de manglar, vegetación secundaria arbustiva de manglar.
Vegetación baja inundable	Popal, tular.
Sin vegetación aparente	Área sin vegetación, vegetación de desiertos arenosos, vegetación secundaria arbustiva de desiertos arenosos.
Agricultura de riego	Agricultura de humedad anual, agricultura de humedad anual y permanente, agricultura de humedad anual y semipermanente, agricultura de humedad permanente, agricultura de riego anual, agricultura de riego anual y permanente, agricultura de riego permanente, agricultura de riego semipermanente, área agrícola de riego suspendido.
Agricultura de temporal	Agricultura de temporal anual, agricultura de temporal anual y permanente, agricultura de temporal anual y semipermanente, agricultura de temporal permanente, bosque cultivado, bosque inducido.
Asentamientos humanos	Asentamientos humanos.
Cuerpos de agua	Cuerpos de agua

ANEXO 6

Tasa de cambio anual en porcentaje de las cinco clases de degradación de la productividad de la tierra (degradada, disminución moderada, estable, estresada, mejora) por región climática.

Región Árida (E)						Región Semiárida seca (D1)				
Año	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora
2001	8.12	-6.19	-2.52	-16.56	26.88	18.30	2.36	-0.74	-4.90	3.04
2002	-3.93	22.39	0.81	-2.63	-2.32	-10.02	-0.23	2.30	-19.54	0.87
2003	-17.69	-21.93	5.60	-19.86	-17.37	5.95	4.51	0.01	-0.93	-0.96
2004	46.93	3.47	-9.31	50.72	31.16	1.68	-22.33	-3.33	28.11	5.96
2005	-31.94	-3.36	10.26	-33.65	-23.76	-1.65	28.75	3.45	-21.94	-5.62
2006	-62.02	12.31	2.54	12.48	-2.87	4.14	1.60	-0.86	11.35	-1.20
2007	138.93	-19.51	-5.04	-2.57	22.51	3.73	-1.85	-1.65	1.97	6.68
2008	-50.87	-5.86	0.64	40.92	-6.70	1.91	-19.41	1.30	25.20	-16.55
2009	99.80	5.88	1.64	-43.38	1.40	-6.00	3.98	0.26	-25.22	16.47
2010	85.20	-7.64	-2.27	27.38	-18.03	27.64	1.64	0.65	0.61	-8.99
2011	-1.92	31.10	-2.03	-4.83	19.46	-17.69	-6.56	-0.25	-11.71	12.08
2012	-29.51	1.24	5.57	-23.56	-11.02	-13.18	13.45	1.43	-0.23	-4.47
2013	-15.38	5.02	-2.55	80.59	-3.34	31.00	10.71	-4.09	43.69	-2.44
2014	90.30	-4.83	-2.15	-43.09	13.59	-0.24	0.43	1.35	-21.73	5.65
2015	-11.10	-11.82	-0.47	42.08	-4.28	-1.60	1.75	-0.54	27.13	-8.53
2016	1.07	-1.84	-0.72	27.50	-9.46	9.80	1.38	-1.91	6.39	3.58
2017	4.50	12.15	1.76	-38.40	10.85	-2.66	1.93	4.73	-37.74	0.01
2018	-21.79	10.36	4.78	-60.33	2.96	6.94	1.71	2.33	-39.30	0.77
2019	31.08	-0.83	-0.64	1.08	-9.51	-26.54	3.12	0.57	-0.40	4.39

Región Semiárida moderada (D2)						Región Semiárida húmeda (D3)				
Año	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora
2001	-4.51	2.71	0.73	-6.38	-0.27	-6.29	8.18	2.30	-26.82	1.89
2002	2.65	-20.25	0.01	-9.42	4.67	7.82	14.87	-1.02	11.35	-1.20
2003	2.83	22.99	0.41	0.80	-4.81	-9.09	-5.87	-0.76	-14.36	18.82
2004	-6.22	-17.93	-1.48	11.24	8.22	2.63	-4.67	0.28	13.88	-8.27
2005	6.64	21.84	1.50	-10.11	-7.59	-2.57	4.90	-0.28	-12.19	9.02

Región Semiárida moderada (D2)						Región Semiárida húmeda (D3)				
Año	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora
2006	-16.75	-3.09	0.81	7.30	-2.64	-20.76	-14.18	1.54	35.62	-17.95
2007	28.14	0.19	-2.35	11.40	2.76	32.47	10.53	-0.41	-21.91	7.75
2008	-22.57	-6.21	2.93	-12.51	-4.39	-28.66	-4.14	2.33	5.76	-10.37
2009	30.13	-0.59	-1.60	-9.66	7.03	50.07	1.47	-1.96	-12.26	9.83
2010	7.17	14.59	-1.14	28.54	-7.10	-4.61	-6.52	0.50	12.54	-7.56
2011	-10.10	-9.46	1.81	-25.47	6.03	-10.58	13.92	-0.18	-12.05	12.03
2012	-9.21	11.16	0.32	11.23	-3.79	-0.09	-1.58	-0.05	4.44	-1.45
2013	27.33	-9.33	-2.10	8.38	2.44	9.50	4.23	-2.41	37.98	-2.16
2014	-12.74	-2.38	0.37	6.13	0.00	-0.91	-6.64	-0.02	-0.21	1.16
2015	15.24	11.22	-0.73	-2.01	-0.15	16.36	3.54	-0.06	-15.83	4.45
2016	3.44	10.73	0.03	1.12	-2.79	-6.84	-3.90	0.82	3.51	-4.95
2017	4.63	1.81	0.77	-18.52	1.99	1.42	3.58	-0.07	-11.49	6.36
2018	3.51	0.48	2.50	-43.07	-0.94	8.32	10.60	2.59	-37.42	-5.55
2019	-8.08	7.12	-0.45	3.43	5.63	4.08	-0.02	-0.60	-0.39	3.23

Región Subhúmeda seca (C1)						Región Subhúmeda húmeda (C2)				
Año	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora
2001	-0.39	13.44	2.00	-33.87	1.02	-0.34	-4.79	0.35	-5.02	-0.37
2002	3.08	-11.77	0.61	-8.94	-2.21	-7.33	6.814	1.49	-13.1	-4.89
2003	-15.61	-2.14	-0.25	21.99	3.08	-1.08	-1.74	-1.4	8.498	11.35
2004	4.68	11.27	0.21	149.70	-44.91	1.645	-7.06	-1.5	8.482	9.787
2005	-4.47	-10.13	-0.21	-59.95	81.51	-1.62	7.595	1.49	-7.82	-8.91
2006	-16.90	-0.81	8.31	23.13	-49.75	-22	1.244	2.41	-19.3	-3.68
2007	31.42	14.76	-7.61	-16.04	89.15	20.85	-1.67	-1.6	26.2	-1.94
2008	-21.20	-4.63	7.11	47.09	-49.94	-33.3	1.276	0.43	19.02	3.533
2009	28.93	-10.46	0.24	-45.01	19.33	52.5	-1.86	-0.6	-18.9	-0.62
2010	3.74	3.09	-11.36	39.37	108.49	2.591	-14.9	-1.4	20.86	4.227
2011	-12.04	7.51	4.81	-7.29	-17.01	-24.9	17.27	3.91	-37.9	-6.28
2012	-9.35	1.40	1.09	-10.19	-0.09	6.229	2.56	-1.3	1.337	10.2
2013	27.34	-1.06	-5.39	5.38	22.47	17.76	-24	-2.6	27.34	10.51
2014	-10.59	2.93	2.05	52.60	-18.58	-2.69	9.624	0.51	6.386	-5.65

Región Subhúmeda seca (C1)						Región Subhúmeda húmeda (C2)				
Año	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora
2015	-3.07	-0.66	2.54	-26.90	-1.89	10.83	16.76	-2.6	3.161	15.79
2016	7.06	-1.17	-0.19	1.09	-1.74	-7.51	-1.95	2.99	0.829	-18.6
2017	0.58	-11.87	-3.19	-29.15	30.07	2.363	-8.37	0.01	-36.4	14.86
2018	12.50	0.80	6.23	-38.03	-25.91	22.38	-11.7	2.28	-36.2	-17.5
2019	-9.44	-1.06	-0.54	-0.44	8.19	2.44	28.4	-1.6	-1.17	12.86

Región húmeda (B)					Región muy húmeda (A)					
Año	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora	Degradada	Disminución moderada	Estable	Estresada	Mejora
2001	-0.34	-4.79	0.35	-5.02	-0.37	-3.10	-0.54	0.69	-6.73	0.30
2002	-7.33	6.81	1.49	-13.06	-4.89	0.89	-2.76	-0.54	-3.81	8.81
2003	-1.08	-1.74	-1.36	8.50	11.35	1.68	7.81	1.21	-15.46	-5.07
2004	1.64	-7.06	-1.46	8.48	9.79	-8.05	-1.23	-2.32	48.34	5.65
2005	-1.62	7.59	1.49	-7.82	-8.91	8.75	1.24	2.38	-32.59	-5.35
2006	-21.99	1.24	2.41	-19.27	-3.68	-20.94	-3.39	2.93	5.92	-18.10
2007	20.85	-1.67	-1.55	26.20	-1.94	18.64	4.07	-3.59	18.46	21.30
2008	-33.31	1.28	0.43	19.02	3.53	-25.47	-2.80	3.37	1.71	-18.20
2009	52.50	-1.86	-0.64	-18.87	-0.62	34.16	1.97	-2.86	-2.24	17.03
2010	2.59	-14.87	-1.36	20.86	4.23	16.40	-1.34	-0.23	-19.63	3.66
2011	-24.95	17.27	3.91	-37.88	-6.28	-13.64	1.23	2.08	-8.99	-5.40
2012	6.23	2.56	-1.31	1.34	10.20	-9.84	-5.95	-0.87	28.88	4.01
2013	17.76	-24.01	-2.60	27.34	10.51	15.05	3.77	-1.39	-0.26	4.51
2014	-2.69	9.62	0.51	6.39	-5.65	19.17	-1.27	-1.01	-8.98	1.11
2015	10.83	16.76	-2.64	3.16	15.79	-1.22	-24.48	-1.38	23.48	4.78
2016	-7.51	-1.95	2.99	0.83	-18.59	0.64	31.44	1.40	-12.50	-8.72
2017	2.36	-8.37	0.01	-36.41	14.86	-5.84	-0.18	1.50	-21.58	3.91
2018	22.38	-11.65	2.28	-36.21	-17.52	16.61	-23.09	0.93	-32.09	-7.09
2019	2.44	28.40	-1.62	-1.17	12.86	2.90	9.12	-0.26	-0.98	-0.75