



BASES DE DATOS, PERCEPCIÓN REMOTA Y SIG APLICADOS A LA GESTIÓN AMBIENTAL

Análisis espacial de la dinámica del paisaje forestal en Mesoamérica (2015-2022).

Spatial Analysis of Forest Landscape Dynamics in Mesoamerica (2015-2022).

Análise espacial da dinâmica da paisagem florestal na Mesoamérica (2015-2022).

Óscar Mario Chacón Chavarría

Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica

omchaco@gmail.com

Gonzalo de la Fuente de Val

Fondo Verde, España

gonzalo.delafuente@fondoverde.org

Artículo científico

Enviado: 28/2/2026

Aprobado: 14/7/2026

Publicado: 22/9/2026

RESUMEN

La transformación del paisaje mesoamericano degrada los bosques latifoliados y montanos, aumentando su vulnerabilidad y riesgo ecosistémico. La investigación analizó la relación entre transformación, fragmentación y amenazas antrópicas en México, Guatemala, El Salvador y Honduras, con el propósito de generar evidencia espacial para priorizar áreas de restauración ecológica. Se utilizaron coberturas forestales de 2015 y 2022, métricas de paisaje y modelos markovianos de cambio de uso del suelo, integrados con los criterios A2a, B1 y B2 de la Lista Roja de Ecosistemas. Los resultados muestran pérdidas de bosque no perturbado de 55.3 % en México y 35.2 % en Guatemala. En Honduras, la fragmentación aumentó 99.7 %, mientras que en El Salvador las tierras deforestadas podrían incrementarse 872 % para 2030. Estas tendencias se asocian con la expansión agropecuaria, la urbanización y los incendios forestales. Se concluye que el riesgo ecosistémico surge de la interacción espacial entre pérdida de cobertura, fragmentación y presiones humanas. La integración del análisis espacial, la modelación del cambio y la evaluación del riesgo ofrece una herramienta útil para orientar la restauración ecológica, fortalecer la planificación territorial y focalizar intervenciones en los paisajes forestales más vulnerables de Mesoamérica durante las próximas décadas mediante decisiones estratégicas sostenibles.

Palabras clave: cadenas de Markov, conectividad ecológica, degradación forestal, ecología del paisaje, Lista Roja de Ecosistemas.

ABSTRACT

The transformation of the Mesoamerican landscape is degrading broadleaf and montane forests, increasing their vulnerability and ecosystem risk. The research analyzed the relationship between transformation, fragmentation, and anthropogenic threats in Mexico, Guatemala, El Salvador, and Honduras, with the aim of generating spatial evidence to prioritize areas for ecological restoration. Forest cover data from 2015 and 2022, landscape metrics, and Markovian land-use change models were used, integrated with criteria A2a, B1, and B2 of the Red List of Ecosystems. The results show losses of undisturbed forest of 55.3% in Mexico and 35.2% in Guatemala. In Honduras, fragmentation

increased by 99.7%, while in El Salvador deforested land could increase by 872% by 2030. These trends are associated with agricultural and livestock expansion, urbanization, and forest fires. It is concluded that ecosystem risk arises from the spatial interaction between cover loss, fragmentation, and human pressures. The integration of spatial analysis, change modeling, and risk assessment offers a useful tool for guiding ecological restoration, strengthening territorial planning, and targeting interventions in the most vulnerable forest landscapes of Mesoamerica over the coming decades through sustainable strategic decisions.

Keywords: ecological connectivity, forest degradation, landscape ecology, Markov chains, Red List of Ecosystems.

RESUMO

A transformação da paisagem mesoamericana degrada as florestas latifoliadas e montanas, aumentando sua vulnerabilidade e risco ecossistêmico. A pesquisa analisou a relação entre transformação, fragmentação e ameaças antrópicas no México, na Guatemala, em El Salvador e em Honduras, com o propósito de gerar evidências espaciais para priorizar áreas de restauração ecológica. Foram utilizadas coberturas florestais de 2015 e 2022, métricas de paisagem e modelos markovianos de mudança de uso do solo, integrados aos critérios A2a, B1 e B2 da Lista Vermelha de Ecossistemas. Os resultados mostram perdas de floresta não perturbada de 55.3% no México e 35.2% na Guatemala. Em Honduras, a fragmentação aumentou 99.7%, enquanto em El Salvador as terras desmatadas poderiam aumentar 872% até 2030. Essas tendências estão associadas à expansão agropecuária, à urbanização e aos incêndios florestais. Conclui-se que o risco ecossistêmico surge da interação espacial entre perda de cobertura, fragmentação e pressões humanas. A integração da análise espacial, da modelagem de mudanças e da avaliação de risco oferece uma ferramenta útil para orientar a restauração ecológica, fortalecer o planejamento territorial e direcionar intervenções nas paisagens florestais mais vulneráveis da Mesoamérica nas próximas décadas, por meio de decisões estratégicas sustentáveis.

Palavras-chave: cadeias de Markov, conectividade ecológica, degradação florestal, ecologia da paisagem, Lista Vermelha de Ecossistemas.

INTRODUCCIÓN

La transformación acelerada del paisaje mesoamericano emerge como uno de los principales motores de degradación ecológica en los bosques tropicales y subtropicales de México, Guatemala, El Salvador y Honduras (Herrera-Fernández y Chacón-Chavarría, 2023). Factores como la expansión agrícola y urbana, la ganadería extensiva, los incendios forestales y la intensificación de las presiones antrópicas impulsan cambios profundos en la estructura y funcionalidad de los bosques latifoliados y montanos, favoreciendo la reducción de la cobertura forestal -boscosa-, el incremento de tierras deforestadas y la consolidación de matrices agropecuarias y urbanas. En este contexto, la degradación de los bosques tropicales y montanos de Centroamérica se encuentra estrechamente vinculada con los cambios en el uso del suelo, los incendios forestales, la fragmentación del paisaje. De acuerdo con Castellanos *et al.* (2022), estos procesos consolidan las matrices agropecuarias y urbanas debido a su vinculación con el incremento de las presiones antrópicas, impulsando el incremento de la vulnerabilidad ecológica y el riesgo de colapso ecossistémico.

En la investigación, la amenaza se asumió como un fenómeno natural o provocado por el ser humano, que puede generar afectaciones en el estado de conservación de los ecosistemas naturales. Por su parte, la severidad fue entendida como el grado de daño funcional esperado, asimismo, el alcance se

refiere a la extensión geográfica probable del impacto sobre el ecosistema boscoso (Herrera-Fernández y Chacón-Chavarría, 2023).

Por su parte, la degradación ecosistémica se refiere al deterioro de las condiciones observables del bosque, resultado de las transformaciones acumuladas. Para este estudio, se expresa por medio de los cambios en la distribución y cantidad de cobertura forestal, el incremento de la fragmentación, la disminución de la agregación y del tamaño promedio de los parches, así como el aumento en la distancia entre los fragmentos.

Además, el riesgo ecosistémico responde a la posibilidad de que la reducción de la distribución territorial y el deterioro de la integridad ecológica comprometan la continuidad del ecosistema. En este sentido la evaluación de las presiones acumulativas se evalúa por medio del uso de los criterios A2a, B1 y B2 de la Lista Roja de Ecosistemas que los ubica en las categorías: *vulnerable, en peligro y en peligro crítico* (Herrera-Fernández y Chacón-Chavarría, 2023). La interacción entre la transformación del paisaje, la fragmentación estructural y la gobernanza insuficiente crea un escenario complejo que requiere de enfoques analíticos integrados.

En este contexto, el problema que orienta la investigación radica en la limitada integración entre los análisis de cambio de uso y cobertura del suelo, la fragmentación del paisaje y las amenazas antrópicas que causan un incremento del riesgo ecosistémico en los bosques mesoamericanos. Si bien estos componentes han sido evaluados por separado, persiste una brecha en su articulación espacial para comprender cómo se relacionan con la degradación y la reducción de la distribución de los ecosistemas boscosos, con el fin de interpretar críticamente la dinámica territorial y sus consecuencias ecológicas.

A partir de este problema se planteó la siguiente pregunta de investigación: *¿cómo se relacionan la transformación, la fragmentación del paisaje, y las amenazas antrópicas con el incremento del riesgo ecosistémico en los bosques mesoamericanos para orientar acciones que fomenten la restauración ecológica?* Partiendo de esta pregunta, el objetivo general fue analizar la interacción entre la transformación y la fragmentación del paisaje, las amenazas antrópicas y el riesgo ecosistémico de los bosques latifoliados y montanos en México, Guatemala, El Salvador y Honduras durante el periodo 2015-2022, mediante análisis espacial, métricas de paisaje, modelación de cambios de cobertura y criterios de la Lista Roja de Ecosistemas, generando evidencia espacial que permita la priorización de áreas para orientar acciones de restauración ecológica.

Para alcanzar este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos: analizar los cambios en el uso/cobertura del bosque por medio del análisis espacial y la modelación markoviana; identificar las principales amenazas vinculadas con la transformación del paisaje y su contribución al deterioro de los ecosistemas boscosos; integrar el análisis espacial, la modelación del cambio, las métricas del paisaje y la evaluación de las amenazas para interpretar el riesgo ecosistémico y discutir sus implicaciones para la planificación y la gestión territorial.

La tesis central de este estudio sostiene que únicamente a través de un enfoque integrado que articule el análisis espacial, la modelación del cambio del uso/cobertura y la evaluación de amenazas es posible desvelar las interacciones de causa-efecto que caracterizan el riesgo ecosistémico, lo cual permite tomar mejores decisiones estratégicas para la conservación y recuperación ecológica de los bosques mesoamericanos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se enmarcó en un enfoque cuantitativo con un diseño no experimental de tipo longitudinal, considerando dos momentos de análisis (2015-2022). Desde esta perspectiva, se implementó un análisis espacial para los bosques latifoliados y montanos presentes en paisajes seleccionados de México, Guatemala, El Salvador y Honduras, orientado a estimar: el cambio en la cobertura del bosque, la degradación asociada a procesos de fragmentación y conectividad estructural, y el nivel de riesgo ecosistémico conforme a los criterios establecidos por la Lista Roja de Ecosistemas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

En este marco, el análisis de los cambios del uso/cobertura del bosque se llevó a cabo mediante técnicas de análisis espacial y modelación markoviana, para lo cual se utilizó cartografía temática con clases estandarizadas y derivadas del mapeo elaborado por la Comisión Europea (1990-2022). Esta comisión clasificó el uso/cobertura en seis categorías: *Undisturbed tropical moist forest* (UTMF); *Degraded tropical moist forest* (DTMF); *Deforested land* (DL); *Tropical moist forest regrowth* (TMFR); *Permanent and seasonal water* (PSW) y *Other land cover* (OLC).

La cuantificación de cambios del bosque se realizó mediante el modelo *Land Change Modeler* (LCM) disponible en el programa IDRISI Selva v.17.0, para lo cual se aplicó la herramienta *Change Analysis*, la cual permitió estimar las ganancias, las pérdidas y las transiciones entre coberturas para el período 2015–2022. La tasa anual promedio de cambio (ha/año) para el año inicial (2015) y el final (2022) se calculó a partir de la ecuación reportada por Puyravaud (2003):

$$R = \frac{(A1 - A2)}{(t2 - t1)}$$

Donde R corresponde a la deforestación total anual promedio del período, A1 es el área de bosque inicial (ha), A2 el área de bosque final (ha), y t1 y t2 representan los años inicial y final del intervalo analizado ($t2 > t1$).

Para estimar las tendencias futuras del cambio de uso del suelo se utilizó el estimador de transiciones markoviano. Por su parte, para la evaluación del riesgo ecosistémico abarcó los criterios A2a, B1 y B2 de la Lista Roja de Ecosistemas de la UICN (Bland *et al.*, 2016). Para A2a, reducción futura de la distribución, se estimó la probabilidad de cambio a un horizonte de 50 años mediante el estimador de transiciones y la función *Cellular Automata/Markov Change Prediction* en el software Idrisi Selva v.17.0; para el criterio B1 (extensión) se delimitó un polígono convexo mínimo por medio de la función *Minimum Bounding Geometry* disponible en ArcGIS Pro v.3.2.1 (2023); mientras que, para el criterio B2 -ocupación- se construyó una cuadrícula de 10×10 km por medio de la herramienta *Crear cuadrícula* disponible en QGIS v.3.34.1 (2023). Por otro lado, la evidencia cuantitativa (cambio y fragmentación), se utilizó como base para la determinación de las categorías de riesgo definidas por la UICN en su publicación Directrices para la aplicación de las categorías y criterios de la Lista Roja de Ecosistemas.

A pesar de la rigurosidad utilizada, el estudio presentó algunas limitaciones que se tuvieron que tomar en cuenta en la interpretación de los resultados:

- El acceso a la información oficial: en países como El Salvador y Honduras se debió utilizar información de densidad poblacional de fuentes globales como WorldPop (2020) como variable de entrada sustituta.

- Para el caso de los cuatro países no fue posible contar con los mapas oficiales de uso/cobertura del suelo, por lo que se debió utilizar información de fuentes globales como el de la Comisión Europea (1990-2022).

Cabe recalcar que, no se realizaron validaciones retrospectivas mediante el uso de un tercer año de información. Por lo tanto, los resultados derivados de este procedimiento se interpretaron como escenarios tendenciales de cambio.

Por otra parte, el análisis de degradación se llevó a cabo mediante la evaluación de la fragmentación del paisaje. Para ello, se emplearon métricas procesadas por medio del programa *Fragstats v.4.2.681*. Los geodatos de uso/cobertura del suelo fueron transformados a formato ráster y reclasificados en dos categorías: bosque y no bosque. Adicionalmente, se preparó un archivo de texto con la descripción de las clases para su incorporación. Las métricas se calcularon a nivel de clase para la categoría de bosque, con el fin de comparar su configuración espacial entre los años analizados.

Se calcularon los siguientes indicadores estructurales: *número de parches* (NP), correspondiente a la cantidad de fragmentos de bosque; *tamaño promedio de parche* (Area_MN) expresado en hectáreas; la *densidad de parches* (PD), calculada a partir de la cantidad de fragmentos en relación con la superficie total del paisaje; la *distancia euclidiana media al vecino más cercano* (ENN), medida de borde a borde entre los parches y el *índice de agregación* (AI), basado en la proporción de adyacencias entre celdas de bosque con respecto al máximo posible. De acuerdo con Huang *et al.* (2024), el uso de este tipo de indicadores permite caracterizar patrones de fragmentación, el aislamiento y el grado de agregación del bosque.

Complementariamente, la conectividad estructural fue evaluada mediante un modelo de álgebra de mapas, que estima la dificultad de movimiento de las especies a través del paisaje, en función de las relaciones de continuidad y vecindad entre los parches de bosque. El modelo combinó cuatro variables espaciales discretas, estandarizadas y ponderadas a partir de su porcentaje de contribución relativa a la resistencia del paisaje: uso/cobertura del suelo (30%), red hídrica (26%), red vial (22%) y densidad de poblados (22%).

La reclasificación de estas variables se realizó siguiendo criterios técnicos y legales para definir la superficie de fricción:

- Uso/cobertura: se asignaron valores de resistencia de 1 a 5, penalizando las clases antrópicas para favorecer que la conectividad se extienda sobre zonas con mayor cobertura natural.
- Red hídrica: se categorizó según las áreas de protección definidas en la legislación de cada país, otorgando una mayor conectividad a aquellos puntos más cercanos al cauce, disminuyendo conforme incrementa la distancia a estos.
- Red vial: el análisis consideró el tipo de camino (red nacional, red cantonal, caminos rurales). Para este geodato, se utilizaron los mapas de red vial definidos por las instituciones correspondiente del registro y resguardo de la información cartográfica de cada país.
- Densidad de poblados: se aplicó un análisis de densidad de puntos (*point density*) para espacializar el efecto inhibitor de los núcleos poblacionales sobre el tránsito biológico. Para ello, se utilizaron los mapas de poblados definidos por las instituciones correspondientes del registro y resguardo de la información cartográfica de cada país.

Los intervalos específicos variaron entre países debido a las diferencias de las fuentes cartográficas y de la distribución de la información. No obstante, en todos los casos se mantuvo una escala común, donde el valor más bajo (1) representó condiciones de muy baja dificultad de movimiento y el valor de cinco (el más alto), correspondió con condiciones de muy alta dificultad.

La superposición final de las capas resultó en una superficie de fricción acumulada que puede clasificar el territorio en clases de dificultad de movimiento, desde 1 corresponde con muy baja dificultad, hasta 5, asociada con una muy alta dificultad, donde se localiza las principales barreras estructurales en el paisaje.

Cada amenaza se representó por medio de un mapa en por medio de una malla de hexágonos numerados. Cada hexágono fue evaluado y valorado por las personas expertas, donde se consideraron la severidad y el alcance, los cuales se combinaron por medio de una matriz, asignando valores a cada celda (*tabla 1*).

Tabla 1. Matriz de valoración del alcance y la severidad de las amenazas.

		Severidad			
		Muy alto	Alto	Medio	Bajo
Alcance	Muy alto	4	3	2	1
	Alto	3	3	2	1
	Medio	2	2	2	1
	Bajo	1	1	1	1

Nota: 4 = Muy alto, 3 = Alto, 2 = Medio, 1 = Bajo. El color indica el nivel de riesgo.

Fuente: Elaborada por los autores.

Además, se modelaron espacialmente las principales amenazas potenciales relacionadas con procesos antrópicos y disturbios recurrentes. Se incorporaron variables de densidad poblacional, proximidad de vías de transporte, incendios forestales basados en puntos de calor obtenidos de los sensores MODIS Collection 6.1, VIIRS-S-NPP 375 m y VIIRS NOAA-20 375 m (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2023) y el uso/cobertura del suelo, estandarizando y normalizando sus valores. Con estas variables se generó un índice compuesto de amenaza, el cual identificó áreas con mayor presión antrópica acumulada y su potencial impacto en la integridad ecosistémica.

Este índice permitió la identificación de los sectores con mayor presión antrópica acumulada y su posible incidencia sobre la integridad ecosistémica.

Para ello, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Índice} = (3 * \text{Urbanización}) + (3 * \text{Transporte}) + (9 * \text{Incendios}) + (9 * \text{Uso de suelo})$$

Dónde los valores de multiplicación por amenaza fueron calculados a partir de un proceso de consulta de personas expertas definidas por los ministerios de ambiente en cada país, quienes establecieron el grado de incidencia de cada amenaza en la conservación o degradación del bosque.

Las ponderaciones utilizadas en la ecuación fueron definidas mediante consenso y conocimiento de las personas expertas consultadas, quienes valoraron la incidencia relativa de cada amenaza sobre la conservación y degradación del paisaje.

Como factor de disminución de las amenazas se consideró la presencia de parques nacionales. Dentro de estas áreas se aplicó una reducción del 15%, mientras tanto, se aplicó una reducción de 25% para

una zona de amortiguamiento de 15 kilómetros a partir del borde de cada área protegida. Esto como posible efecto de la presencia de las áreas protegidas sobre la disminución de las presiones antrópicas.

Desde el punto de vista espacial, el análisis de las amenazas actuales por medio de la consulta experta utilizó una resolución de acuerdo con el contexto del paisaje por país, es así como, para el caso de México se utilizaron celdas de 10x10 km, en el caso de El Salvador, se utilizó una resolución de tamaño de celdas de 1.5x1.5 km debido que el paisaje era mucho más reducido, mientras que, para Guatemala y Honduras se utilizó una escala de 5x5 km.

En cuanto a las capas de incendios forestales provenientes de VIIRS, la resolución nominal es de 375 m, mientras que la cobertura forestal se derivó de la colección Landsat, cuya resolución espacial es de 30 m.

Finalmente, la investigación no incorporó una evaluación directa de algún criterio relacionado de manera directa con la gobernanza territorial. Este aspecto fue mencionado expresamente por las personas expertas consultadas, sin embargo, no se establecieron indicadores para su medición. Por tanto, las referencias a la gobernanza y la planificación territorial se emplearon únicamente como marco interpretativo y de aplicación de los resultados espacialmente explícitos.

RESULTADOS

Cambios observados en la cobertura forestal durante el periodo 2015-2022

El análisis de la dinámica del paisaje de los ecosistemas boscosos revela una tendencia generalizada hacia la degradación y pérdida de la cobertura boscosa. Entre los años 2015 y 2022 se produjo una disminución de los bosques latifoliados no alterados, los cuales han pasado a ser principalmente bosques degradados y suelo deforestado.

La *figura 1* muestra espacialmente la ubicación de los sitios que se asocian con estos cambios, permitiendo identificar los frentes de cambio de la cobertura forestal en los sitios de análisis a nivel Mesoamericano. El mapa muestra las áreas donde el bosque latifoliado no alterado (UTMF) ha sido deforestado, pasando de UTMF a DTMF; degradado, pasando de UTMF a DTMF y regeneración, siendo inicialmente UTMF a TMRF.

El bosque latifolio siguió un patrón convergente de pérdida de bosque no alterado (UTMF) entre los años 2015 y 2022 y un incremento de tierras deforestadas (DL) en los sitios de estudio de los cuatro países, aunque en magnitudes distintas. México es el país con mayor caída relativa de UTMF con una disminución de 55.3% y un aumento de DL de 42.1%, en tanto Guatemala presentó una pérdida de 35.2% de UTMF; mientras las tierras deforestadas -DL- incrementaron en un 21.4%. Por otra parte, Honduras presentó una disminución de 20.7% de UTMF y un incremento de 22.3% en tierras deforestadas -DL-. En el caso de El Salvador se muestra una menor caída de UTMF, representado por un 7.9%, mientras que, las tierras deforestadas incrementaron en un 5%, sin embargo, cabe resaltar que esta misma zona presenta una proyección de incremento del 872% en tierras deforestadas para el año 2030 de acuerdo con los resultados obtenidos a partir del modelaje elaborado por medio de cadenas de Markov, pasando de 500 a 4867 ha, lo cual indica un alto potencial de aceleración del cambio bajo presiones continuas.

Por otra parte, la fragmentación y conectividad han sufrido un proceso de transformación en cuanto a área y estructura quedando evidente en los datos de la *tabla 1*. El paisaje de Honduras se caracteriza por el incremento en el número de parches (NP) en más de 99.7%, mientras que, su tamaño promedio (Area_MN) presenta una disminución el 38.6%, lo que es característico de una fuerte fragmentación. Guatemala por su parte, presenta una disminución en el número de parches (NP) de 31.2%, lo cual puede deberse a los resultados de estrategias de conservación, especialmente asociadas con la presencia de la Reserva de la Biósfera Maya-Petén. Además, el área (Area_MN) y el aislamiento (ENN) presentan un incremento respectivo de 26.7% y 15.8%, lo que indica una menor cantidad de parches, siendo que los presentes son más grandes, pero más aislados. En México se superpone la disminución de parches (NP) en un 7.9%, con la del tamaño promedio (Area_MN) de 2.8% y una menor agregación

(AI) de 1.1%, sugiriendo una mayor dispersión. Finalmente, El Salvador muestra pequeños cambios con signos de agrupamiento (AI) de 2.7% y un menor aislamiento (ENN) de 7.8%, en comparación con el resto de los sitios seleccionados y asociados con el bosque latifoliado de cada uno de los países. Estos datos respaldan que el riesgo del bosque latifoliado no es sólo una función de cuánto bosque se pierde, sino de cómo se estructura el bosque restante.

Asimismo, la *tabla 2* resalta que el riesgo ecosistémico y las presiones antrópicas son causadas por la convergencia de los factores territoriales vinculadas con la expansión agropecuaria, la urbanización e infraestructura vial en México y Guatemala; así como incendios recurrentes y cambio de uso del suelo en Honduras; mientras que, en El Salvador, los incendios y la presión transfronteriza, corresponden con los principales agentes transformadores del paisaje. En ese sentido, la particularidad mesoamericana se estima emerge de la combinación de la pérdida total de bosque (UTMF) con expansión de la deforestación (DL), así como las trayectorias nacionales fragmentadas, NP, Area_MN, ENN, AI que determinan la conectividad y la vulnerabilidad.

Tabla 2. *Síntesis de resultados de deforestación, fragmentación, riesgo y presiones antrópicas para el bosque latifoliado en Mesoamérica (2015-2022).*

País	Deforestación y cambio de cobertura (2015-2022)	Fragmentación (2015-2022)	Riesgo ecosistémico	Presiones antrópicas dominantes
México	UTMF: -518 157ha (-55.3%); DL: +203 551ha (+42.1%); cambio +8 540ha (+0.4%) de bosque	NP: -17 491 (-7.9%); Area_MN: -0.29 (-2.8%); ENN: -0.5 (-0.3%); AI: -0.93 (-1.1%)	Lista Roja (A2a, B1, B2): los resultados muestran tendencias de reducción y deterioro que podrían avanzar hacia categorías de mayor riesgo si continúan las prácticas actuales.	Expansión agrícola/ganadera; urbanización y desarrollo vial; consolidación de matriz agropecuaria.
Guatemala	UTMF: -241 051 (-35.2%); DL: +39 489 (+21.4%); cambio -13 500 (-1.6%) de bosque	NP: -8 446 (-31.2%); Area_MN: +9.48 (+26.7%); ENN: +21.9 (+15.8%); AI: +0.96 (+1.0%)	Lista Roja (A2a, B1, B2): reportan tendencias de reducción y deterioro que podrían avanzar hacia categorías de mayor riesgo si continúan las tendencias actuales.	Expansión agrícola/ganadera asociada a infraestructura vial y asentamientos; presión sobre continuidad del bosque.
El Salvador	UTMF: -330ha (-7.9%); DL: +30ha (+5.0%); cambio +2 301ha (+24.7%) de bosque	NP: +22 (+1.6%); Area_MN: +2.75 (+50.0%); ENN: -12.2 (-7.8%); AI: +2.09 (+2.7%)	Lista Roja (A2a, B1, B2): los resultados del Criterio B1 sugieren Peligro Crítico para bosques montanos; además reporta proyección de deforestación - DL- de 872% al 2030 en sitio fronterizo.	Incendios forestales asociados a prácticas agropecuarias; expansión agropecuaria/urbanización y red vial; presión transfronteriza.

País	Deforestación y cambio de cobertura (2015-2022)	Fragmentación (2015-2022)	Riesgo ecosistémico	Presiones antrópicas dominantes
Honduras	UTMF: -265 281 (-20.7%); DL: +107 638 (+22.3%); Bosque*: -16 518 (-0.9%)	NP: +44 318 (+99.7%); Area_MN: -12.22 (-38.6%); ENN: -9.7 (-6.4%); AI: -0.26 (-0.3%)	Lista Roja (A2a, B1, B2): reportan un aumento de amenazas de incendios y pérdida de cobertura; mientras que no se registra una categoría específica de riesgo para el ecosistema.	Incendios forestales recurrentes; expansión agropecuaria y conversión a usos no forestales.

Nota: **UTMF** = bosque húmedo tropical no perturbado; **DTMF** = bosque húmedo tropical degradado; **DL** = tierra deforestada; **TMFR** = regeneración; la categoría bosque se constituye por la suma de las categorías UTMF + DTMF + TMFR; **NP** = número de parches; **Area_MN** = tamaño promedio de parche en hectáreas; **PD** = densidad de parches (cantidad de parches por cada 100 ha); **ENN** = distancia en metros media al vecino más cercano; **AI** = índice de agregación (porcentaje). **Fuente:** Elaborada por los autores.

Resultados proyectados del cambio de cobertura

A diferencia de los cambios anteriormente descritos, los resultados de las proyecciones en el cambio de cobertura para el 2030, están relacionados con escenarios tendenciales a partir del uso de cadenas de Markov. Por otra parte, tal como se mencionó en la sección metodológica, este análisis no incluyó validaciones retrospectivas mediante un tercer año, por lo que, esta proyección no representa una predicción determinista, sino una posible trayectoria bajo el supuesto de que las condiciones de presión actual se mantengan de manera sostenida en el tiempo.

El resultado más relevante se registró en El Salvador, donde las tierras deforestadas (DL) podrían incrementar su área en aproximadamente 872%, pasando de 500 ha en el 2022 a 4.867ha en el año 2030. Asimismo, las proyecciones en los demás países resaltan la continuidad de las transiciones de bosque no perturbado (UTMF) a bosque degradado (DTMF), regeneración secundaria (TMFR) o tierras deforestadas (DL), no obstante, su interpretación debe centrarse en la dirección y distribución espacial pero no en los valores absolutos.

Amenazas actuales y potenciales

Los resultados obtenidos a partir de la consulta a las personas expertas, junto con el análisis espacial permitieron determinar diferencias en la combinación de las amenazas dominantes. Es así como, para el caso de México y Guatemala, las principales presiones se asociaron con la expansión agropecuaria, el desarrollo urbano, la infraestructura vial, la extracción de recursos y la transformación de los bordes boscosos.

Mientras tanto, en el caso de Honduras las principales amenazas estuvieron relacionadas con los incendios recurrentes, la expansión agropecuaria y la conversión del bosque a otros usos. Cabe indicar que, para este país en específico, la coincidencia entre las presiones y el incremento en el número de parches conduce a identificar sectores donde la pérdida de bosque y la fragmentación pueden reforzarse mutuamente.

Finalmente, en el caso de El Salvador, los incendios forestales, la expansión urbana y agrícola, junto al incremento en la infraestructura vial y las presiones por transformación del paisaje, responden a las principales perturbaciones. La incidencia de estas amenazas resalta especialmente debido a la reducida extensión de los bosques montanos en el área de estudio.

Es imperativo tomar en consideración que, la superposición de las amenazas no debe interpretarse como una relación causal. Sin embargo, la convergencia espacial entre las presiones antrópicas con la pérdida de cobertura y la fragmentación permite identificar zonas que presentan mayor exposición potencial al deterioro ecosistémico.

Comparación regional

Los resultados evidencian que, a nivel regional, los cuatro países analizados presentan procesos de transformación forestal, sin embargo, presentan manifestaciones ecológicas diferenciadas. Honduras mostró que el proceso más fuerte corresponde con la fragmentación estructural. México por su lado, registró la mayor pérdida relativa de cobertura boscosa no perturbada (UTMF), de igual manera, Guatemala, presentó una importante pérdida de este mismo tipo de bosque, no obstante, conserva bloques de bosque de mayor tamaño progresivamente más aislados. Finalmente, los bosques analizados de El Salvador presentan menor cantidad de cambios en términos absolutos, pero presenta un panorama tendencial complicado al 2030, asociado con una potencial aceleración de la deforestación dentro de un ecosistema pequeño y vulnerable.

En términos generales no existe una trayectoria homogénea de degradación a nivel regional, por lo que, las prioridades de restauración deben responder a condiciones diferenciadas que procuren la conectividad y la mejora en la calidad de los parches remanentes de Honduras; reducir el aislamiento de los grandes bloques de bosque en Guatemala; mejorar la agregación y proteger los remanentes en México; así como prevenir las futuras transformaciones y fomentar el desarrollo de corredores biológicos por medio de la recuperación de las áreas degradadas en El Salvador.

DISCUSIÓN

Transformación del paisaje y cambio de uso

Los principales hallazgos de este estudio revelan que, a lo largo de las últimas décadas, el paisaje mesoamericano ha experimentado una transformación constante que se hace visible en cada país de la región, aunque con matices propios de sus contextos sociales, económicos y ambientales. En México y Guatemala, por ejemplo, la expansión agrícola y ganadera avanza de manera progresiva sobre los bosques latifoliados, dando paso a cambios estructurales en el territorio y en la continuidad de los ecosistemas forestales, tal como se evidencia en los análisis de cobertura realizados entre los años 2015 y 2022 para ambos países (Herrera-Fernández y Chacón-Chavarría, 2023).

De manera similar, en El Salvador y Honduras, la presión antrópica se manifiesta en la reducción acelerada del bosque y en el aumento marcado de las zonas deforestadas, proyectando escenarios tan críticos como el incremento del 872% en tierras deforestadas para el 2030, pasando de 500 a 4867 ha, en el sitio de estudio salvadoreño cercano a la zona fronteriza con Guatemala y Honduras. Estos procesos, aunque distintos en intensidad, comparten un patrón espacial caracterizado por la coincidencia entre la transformación de la cobertura forestal y la presencia de actividades agropecuarias, infraestructura, asentamientos humanos e incendios forestales. Sin embargo, debido que el estudio presenta un diseño no experimental, esta convergencia espacial debe interpretarse como una asociación territorial y no como una relación causal.

Así lo resaltan Ma *et al.* (2023), quienes en un análisis global de la fragmentación forestal entre los años 2000 y 2020, identificaron que las regiones tropicales, experimentaron los procesos de fragmentación más intensos del planeta.

Presiones antrópicas territoriales vinculadas con la transformación del paisaje

A medida que se observan estos cambios, también se hace evidente que la transformación del paisaje no actúa de manera aislada, sino como resultado de una combinación de factores entrelazados en el espacio y el tiempo. Por un lado, la expansión de las actividades productivas siguiendo el trazo de la infraestructura vial, los asentamientos y las zonas agrícolas, se encuentra ampliamente documentada en bases de datos oficiales de México y Guatemala (Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía, 2022; Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia, s.f. a, b y c.) y en los mapas poblacionales regionales (WorldPop, 2020).

Asimismo, los incendios forestales, a menudo asociados con prácticas agropecuarias, presentan una intensificación notable en Honduras y El Salvador. Según los registros satelitales de la NASA (2023), se observan focos recurrentes que, al coincidir con áreas previamente degradadas, contribuyen a un aumento en la pérdida de cobertura forestal. Esta correspondencia permite identificar sitios que presentan mayor exposición potencial a nuevas perturbaciones, sin embargo, no demuestra por sí misma que los incendios hayan provocado directamente los cambios identificados en el estudio.

Tal como lo evidencia el World Resources Institute (2025), la pérdida de los bosques se vincula con presiones antrópicas entre las que destacan los incendios forestales. De esta manera, el análisis conjunto entre los incendios, la expansión agropecuaria y la fragmentación del bosque muestra patrones de concentración espacial que puede ser utilizado para reconocer sitios potencialmente más expuestos. No obstante, como el análisis de las amenazas se llevó a cabo por medio de consulta a personas expertas, la determinación de la contribución causal de cada presión requiere de la incorporación de análisis estadísticos, series temporales más extensas y validación de campo.

Estudios recientes como el de Jones *et al.* (2024) identificaron un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas, detectando una interacción entre el fuego y las condiciones climáticas. Aunque el estudio se basa en un análisis global, sus resultados evidencian la importancia de considerar la interacción entre el fuego, las condiciones climáticas y la dinámica de la vegetación. En relación con los resultados de esta investigación, los patrones detectados en Honduras y El Salvador deben ser interpretados como resultado de las presiones potenciales concurrentes.

Fragmentación del paisaje y pérdida de conectividad estructural

Esta dinámica de presiones acumulativas conduce a un fenómeno particularmente preocupante, conocido como fragmentación del bosque, el cual responde a un ecosistema anteriormente continuo, que se divide en múltiples parches pequeños y aislados, provocando reducción notable en la conectividad ecológica. Bello *et al.* (2024) evidencian que la regeneración natural depende en gran medida de procesos mediados por la fauna, validando entonces que este fenómeno de la fragmentación limita la capacidad de movimiento de la fauna, disminuye la capacidad del ecosistema para recuperarse tras perturbaciones y altera los ciclos ecológicos esenciales para mantener la continuidad de los servicios ecosistémicos. Los análisis de fragmentación realizados mediante el programa informático *Fragstats* (Ene y Mcgarigal, 2023) muestran que, existen trayectorias estructurales diferenciadas.

Mientras que, Honduras presentó una subdivisión marcada del bosque con una mayor cantidad de fragmentos de menor tamaño, México se caracterizó por presentar una reducción del tamaño promedio y de la agregación. En el caso de Guatemala, los parches de cobertura forestal tienden a

fragmentarse en estructuras más pequeñas, al tiempo que aumentan los bordes expuestos a las actividades humanas, incrementando la vulnerabilidad del bosque ante incendios, el arribo de especies invasoras y cambios drásticos en las condiciones de humedad y temperatura del suelo, mientras tanto, El Salvador presentó cambios menores y evidencias localizadas de aislamiento (Herrera-Fernández y Chacón-Chavarría, 2023). Desde esta perspectiva, la fragmentación deja de ser únicamente un patrón espacial para convertirse en un factor determinante del riesgo ecosistémico, al amplificar la exposición de los bosques a múltiples amenazas concurrentes.

Estos resultados concuerdan con estudios como el de San-José *et al.* (2022), en el que se señala que la configuración del paisaje influye en su capacidad de recuperación ecológica. Dicho estudio fue realizado en el sur de Costa Rica e indica que una mayor cobertura forestal y un menor grado de fragmentación favorecen una mayor abundancia y riqueza de aves. Además, destaca la importancia de incluir métricas del paisaje en todo proyecto de restauración, ya que estas permiten comprender la influencia de la estructura del paisaje en los resultados de las intervenciones.

Convergencia de amenazas y evaluación del riesgo ecosistémico

Junto a la fragmentación, otro elemento clave es la presencia de amenazas actuales y potenciales, distribuidas de manera desigual en el territorio (Herrera-Fernández y Chacón-Chavarría, 2023). La urbanización, el desarrollo vial, los incendios forestales y la expansión agropecuaria son amenazas que actúan simultáneamente en estos lugares, generando condiciones que favorecen la degradación del bosque y su transición hacia usos no forestales. La suma de amenazas sugiere la existencia de presiones acumulativas sobre el territorio. Si bien, el índice compuesto representa una aproximación espacial basada en conocimiento experto lo cual, no permite estimar estadísticamente la magnitud individual de cada una de las amenazas. A pesar de ello, la convergencia espacial y temporal de estas amenazas hace necesaria la adopción de marcos de evaluación que permitan traducir la presión territorial acumulada en categorías objetivas de riesgo ecosistémico.

Al considerar estas transformaciones, se vuelve indispensable evaluar los riesgos ecosistémicos asociados con estas dinámicas. Para ello, la aplicación de criterios de la Lista Roja de Ecosistemas como son el A2a, el B1 y el B2, conforme al marco técnico oficial de la UICN para la clasificación del riesgo ecosistémico (Keith *et al.*, 2024), revela que varios bosques mesoamericanos cumplen con indicadores críticos relacionados con reducción de extensión, aumento de fragmentación y disminución en la calidad ecológica.

En el caso de El Salvador, por ejemplo, el análisis de extensión de presencia y número de localidades, Criterio B1, sugiere que los bosques montanos podrían clasificarse en la categoría de *peligro crítico*, debido a sus reducidas áreas y alta vulnerabilidad ante amenazas futuras. Del mismo modo, los ecosistemas boscosos de Guatemala y México muestran tendencias preocupantes de reducción y deterioro que, de continuar, podrían avanzar hacia categorías de mayor riesgo (Herrera-Fernández y Chacón-Chavarría, 2023). Estos resultados refuerzan la convicción de que la región enfrenta no solo una crisis ecológica, sino desafíos de planificación territorial, lo que sugiere una necesidad de fortalecer la coordinación entre los diferentes actores del territorio -instituciones, ministerios, sociedad civil, empresas-, para plantear acciones preventivas ante las amenazas identificadas.

Gobernanza y acciones de restauración ecológica para la adaptación

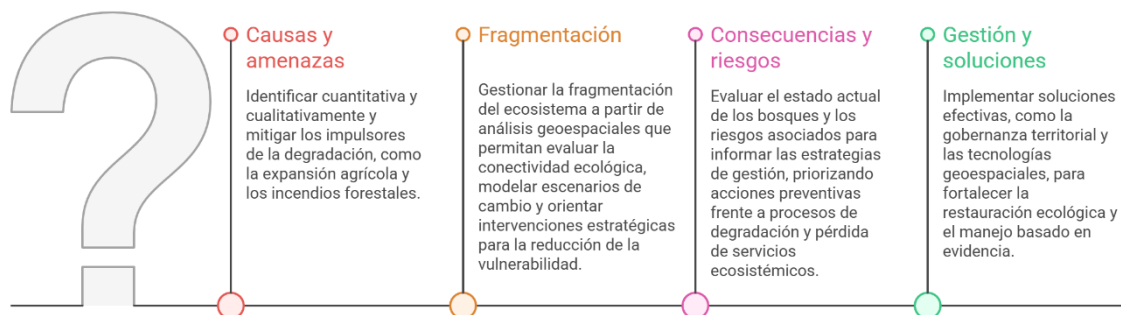
Frente a este panorama, resulta evidente que la restauración ecológica y la planificación territorial deben sustentarse en enfoques integrados que articulen análisis espacial, modelación de cambio y evaluaciones de amenazas. El valor real de herramientas como el ArcGIS Pro (ESRI, 2023), QGIS (2023) e IDRISI Selva (Clark Labs, 2012) o los modelos markovianos, no radica únicamente en su capacidad

técnica, sino en el potencial que poseen para traducir datos en decisiones políticas y comunitarias más informadas. Asimismo, permiten anticipar escenarios futuros y, en consecuencia, diseñar e implementar políticas de gestión territorial que no respondan solamente a las condiciones actuales, sino también que permitan planificar estrategias orientadas a mitigar las tendencias de degradación previstas en el corto y mediano plazo. De esta forma, se fortalece la comprensión sobre qué está sucediendo en el paisaje, así como dónde se localizan las transformaciones y cómo podrían evolucionar bajo un comportamiento de continuidad de las tendencias. A pesar de ello, es necesario explicar por qué se presentan estos cambios, para lo cual, se requiere de análisis adicionales con información socioeconómica, institucional y participación multisectorial.

En un estudio realizado por Shelton *et al.* (2024) se evaluaron 449 artículos académicos publicados durante el periodo 2000-2023 donde se identificó que solamente 40 abordaron temas asociados con perspectivas sociales críticas, a partir de la lectura de los 40 artículos realizada por los autores, se concluyó que las dimensiones sociales, la relación de poder y la diversidad de conocimientos recibe una atención insuficiente. Por su parte, Mansourian *et al.* (2025) señalan que se requiere del involucramiento activo y equitativo de actores sociales de múltiples sectores en los proyectos de restauración. Por ello, la evidencia espacial generada durante este estudio puede apoyar las decisiones de gobernanza, pero complementarse con evaluaciones participativas.

Para facilitar la comprensión integral de estos procesos, en la *figura 2* se resume el proceso de abordaje sugerido para gestionar la degradación y transformación del bosque mesoamericano.

Figura 2. Proceso de abordaje de la degradación y transformación de los bosques latifoliado y montanos de Mesoamérica.



Fuente: Elaborada por los autores.

Al llevar a cabo la integración de estos distintos elementos; cambio de cobertura, fragmentación, amenazas y riesgo ecosistémico; se procura generar una visión más completa de la situación de los bosques mesoamericanos. Esta mirada revela que la *restauración ecológica* y la *planificación territorial* no pueden concebirse únicamente como acciones locales, sino como procesos que requieren coordinación transfronteriza, y de todos los actores presentes en el territorio -instituciones, academia, empresas y comunidades- así como una *participación de los actores territoriales* capaz de incorporar la evidencia científica en la toma de decisiones. Por ello, el análisis espacial y la modelación de cambio se consolidan como aliados estratégicos para orientar el desarrollo de intervenciones efectivas y para tratar de anticipar los desafíos futuros que enfrentarán los bosques de la región, especialmente en un contexto donde el cambio climático intensifica los efectos de la degradación actual.

Recomendaciones para política pública

En coherencia con lineamientos internacionales recientes como los de la Convención de Diversidad Biológica (2024) y las Orientaciones sobre Otras Medidas Efectivas de Conservación Basadas en Áreas (OMEC), elaborado por Jonas *et al.* (2024), se hace necesario y casi obligatorio plantear una visión

regional de gobernanza territorial con el fin de influir de manera directa en los patrones de fragmentación, estableciendo (i) reglas de ordenamiento y zonificación, (ii) delimitaciones y propuesta de conservación más allá de las áreas protegidas que puedan estar relacionadas con el paisaje productivo como pueden ser las Otras Medidas Efectivas de Conservación Basadas en Áreas, (iii) proponer arreglos de tenencia y derecho de uso de la tierra y (iv) fomentar el desarrollo de capacidades para el cumplimiento y control territorial.

Estas medidas podrían contribuir a reducir la probabilidad de conversión del bosque asociada con el desarrollo de nueva infraestructura, la expansión agropecuaria, las nuevas áreas habitacionales e incluso los efectos adversos del cambio climático. No obstante, su efectividad debe ser evaluada por medio de indicadores de implementación, participación multisectorial, cumplimiento y resultados ecológicos, lo cual podría traducirse a paisajes más agregados o más atomizados y con mayor continuidad para mantener los servicios ecosistémicos, tal como es el caso de la coestión de las áreas protegidas transfronterizas de El Trifinio, Parque Nacional Montecristo y Reservas Biológicas - Guatemala, El Salvador y Honduras-, así como el Corredor Biológico Mesoamericano, los cuales, forman parte de las iniciativas de integración en la región para la conservación de los bosques, su biodiversidad y servicios ecosistémicos.

Alcances y limitaciones de la interpretación

En primer lugar, la comparación regional se sustentó en cartografía global de cobertura forestal. Si bien, la fuente proviene de imágenes satelitales que posee una buena resolución espacial para datos nacionales, para asegurar una buena interpretación de las diferentes clases interpretadas, es necesario realizar procesos de verificación y validación de campo. En segundo lugar, las proyecciones obtenidas a partir del análisis de cadenas de Markov se construyeron a partir de solamente dos fechas, por lo que, es recomendable incluir una tercera fecha que permita la validación retrospectiva.

En tercer lugar, las ponderaciones del índice compuesto de amenazas, se definió a partir del consenso y conocimiento experto. Si bien, este procedimiento permite incorporar información territorial es importante incluir un análisis de sensibilidad para determinar cuánto cambian los resultados al modificar los pesos asignados. Finalmente, para fortalecer los análisis de conectividad es recomendable incluir una evaluación de la conectividad funcional, incluyendo indicadores directos sobre biodiversidad, desplazamiento de la fauna, calidad del hábitat o disponibilidad de servicios ecosistémicos.

CONCLUSIONES

Es evidente que los bosques latifoliados y montanos analizados, presentan procesos diferenciados de transformación entre los años 2015-2022. En los cuatro países se observó disminución del bosque húmedo tropical no perturbado (UTMF), mientras que las tierras deforestadas (DL) presentan un incremento de diferente magnitud para cada territorio. México presentó la mayor pérdida relativa con 55.3%, seguido de Guatemala con 35.2%, Honduras con 20.7% y El Salvador con 7.9%. Estos resultados muestran que la degradación regional no se expresa únicamente por la pérdida neta de bosque, sino también por la transformación de las coberturas no perturbadas en bosques degradados, bosques en regeneración y usos no forestales.

Las métricas de paisaje permitieron identificar configuraciones ecológicas diferenciadas, donde México presentó una reducción en el tamaño promedio de los parches y un índice de agregación menor. Por su parte, Guatemala registró una menor cantidad de parches, pero de mayor tamaño y aislados. Honduras por su lado, presentó las condiciones más extremas en cuanto a fragmentación estructural con un incremento de 99.7% en la cantidad de parches y una disminución de 38.6% en su

tamaño promedio, lo cual se asocia con la expansión agropecuaria, los incendios forestales y la transformación del bosque a usos no forestales. Asimismo, los incendios forestales, la expansión urbana y agrícola, junto a la red vial y las presiones que provocan modificación de los ecosistemas son los más recurrentes en El Salvador.

La modelización del cambio de uso y cobertura mediante la aplicación de las cadenas de Markov, junto a los análisis multitemporales y las métricas del paisaje, brindan información técnica relevante, que ayuda a reconocer las tendencias y localizar las áreas prioritarias de restauración. Asimismo, la aplicación de los criterios A2a, B1 y B2 de la Lista Roja de Ecosistemas, permitió relacionar la reducción de la distribución, la extensión y el área de ocupación de los ecosistemas boscosos en los países analizados. Resaltando el caso de los bosques montanos de El Salvador que presentaron condiciones de mayor vulnerabilidad por su reducida extensión y exposición ante las amenazas.

Los resultados confirman la necesidad de fortalecer los sistemas nacionales y regionales de monitoreo del paisaje, mediante el uso sistemático de métricas de fragmentación, conectividad y herramientas geoespaciales. El cual, debe orientarse no solo a la cuantificación de la pérdida, sino también a evaluar la calidad, la configuración y la funcionalidad del bosque remanente. Las futuras investigaciones deben incorporar series temporales más extensas, cartografía oficial armonizada, validación de los modelos de cambio, análisis de sensibilidad y métricas funcionales de conectividad. Asimismo, es recomendable incorporar escenarios de cambio climático y procesos de participación ciudadana que fomenten una gobernanza ambiental participativa.

La sostenibilidad de los bosques mesoamericanos requiere de una planificación territorial integrada, sustentada en evidencia científica y articulada con las políticas públicas y participación ciudadana. Esto permitirá orientar acciones de conservación y restauración, reducir la vulnerabilidad, fortalecer la resiliencia socioecológica y mantener los servicios ecosistémicos ante las crecientes presiones territoriales y climáticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bello, C., Crowther, T. W., Leal Ramos, D., Morán-López, T., Pizo, M. A. y Dent, D. H. (2024) *Frugivores enhance potential carbon recovery in fragmented landscapes*. *Nature Climate Change*, 14, 636-643. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-01989-1>
- Bland, L. M., Keith, D. A., Miller, R. M., Murray, N. J. y Rodríguez, J. P. (Eds.). (2016). *Directrices para la aplicación de las categorías y criterios de la Lista Roja de Ecosistemas de UICN*. Versión 1.0. UICN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.RLE.1.es>
- Castellanos, E., Lemos, M. F., Astigarraga, L., Chacón, N., Cuví, N., Huggel, C., Miranda, L., Moncassim Vale, M., Ometto, J. P., Peri, P. L., Postigo, J. C., Ramajo, L., Roco, L. y Rusticucci, M. (2022). Central and South America. In H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Eds.), *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (pp. 1689-1816). Cambridge University Press. <https://acortar.link/6LWXdY>
- Clark Labs. (2012). *Idrisi Selva Edition* (versión 17.0). [Software]. Clark University. <https://acortar.link/Lr72Uy>
- Convención de Diversidad Biológica. (2024). *Consolidated guidance notes for the targets of the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework (Targets 1-23)*. <https://acortar.link/T7Sm7m>

- Ene, E. y Mcgarigal, K (2023). *Fragstats. A Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. (v.4.2.681) [Software]. <https://acortar.link/fWw9KP>
- ESRI. (2023). *ArcGis Pro v.3.2.1*. [Software]. ArcGis Pro. <https://acortar.link/3As2Kv>
- Herrera-Fernández, B.y Chacón-Chavarría, O. (2023). *Assessing the threats and degradation level of Mesoamerica critical forest biome in El Salvador, Guatemala, Honduras, and México* [Informe de investigación]. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.
- Huang, Y., Zheng, M., Li, T., Xiao, F. y Zheng, X. (2024). An Integrated Framework for Landscape Indices' Calculation with Raster–Vector Integration and Its Application Based on QGIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(7), 242. <https://doi.org/10.3390/ijgi13070242>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. (2022). *Red nacional de caminos*. [Mapa] <https://acortar.link/6FDVWZ>
- Jonas, H., Wood, P. y Woodley, S. (Eds.) (2024). Guidance on other effective area-based conservation measures (OECMs). Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales. <https://doi.org/10.2305/LAAW4624>
- Jones, M. W., Veraverbeke, S., Andela, N., Doerr, S. H., Kolden, C., Mataveli, G., Pettinari, M. L., Le Quéré, C., Rosan, T. M., van der Werf, G. R., van Wees, D. y Abatzoglou, J. T. (2024). Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics. *Science*, 386(6719), eadl5889. <http://doi.org/10.1126/science.adl5889>
- Keith, D. A., Ferrer-Paris, J. R., Ghoraba, S. M. M., Henriksen, S., Monyeke, M., Murray, N. J., Nicholson, E., Rowland, J., Skowno, A., Slingsby, J. A., Storeng, A. B., Valderrábano, M. y Zager.(Eds.).(2024).*Guidelines for the application of IUCN Red List of Ecosystems categories and criteria (Version 2.0)*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales. <https://doi.org/10.2305/CJDF9122>
- Ma, J., Li, J., Wu, W. y Liu, J. (2023). Global forest fragmentation change from 2000 to 2020. *Nature Communications*, 14, 3752. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39221-x>
- Mansourian, S.; Djenontin, I.N.S.; Elias, M.; Oldekop, J.A.; Derkyi, M.A.A.; Kull C.A. y Pacheco, P. (2025) Situating the “human” in forest landscape restoration. *Frontiers in Environmental Science*, 12,1522979. <http://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1522979>
- National Aeronautics and Space Administration. (2023). *Fire Information for Resource Management System*. [Mapa]. <https://acortar.link/u6KRnG>
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 593-596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)
- QGIS. (2023). *Qgis. Un sistema de información geográfica libre y de código abierto*. (v.3.34.1) [Software] <https://qgis.org/es/site>
- San-José, M., Werden, L.K., Joyce, F.H., Leighton, J., Holl, K., Zahawi, R. (2022). Effects of landscape structure on restoration success in tropical premontane forest. *Scientific Reports*, 12, 13452. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16542-3>
- Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia. (s.f., a). *Mapa de red vial de Guatemala*. [Mapa]. <https://ideg.segeplan.gob.gt/geoportail>

Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia-. (s.f., b). *Lugares poblados de Guatemala*. [Mapa]. GeoServer. <https://acortar.link/Z4dx7G>

Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia. (s.f., c). *Mapa de la red hídrica de Guatemala*. [Mapa]. GeoServer. <https://acortar.link/RdZ5pc>

Shelton, M.R.; Kanowski, P.J.; Kleinschmit, D. y Ison, R.L. (2024) Critical social perspectives in forest and landscape restoration – a systematic review. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1466758. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1466758>

WorldPop. (2020). *Population Density in 2020, El Salvador*. School of Geography and Environmental Science, University of Southampton; Department of Geography and Geosciences, University of Louisville; Departement de Geographie, Universite de Namur and Center for International Earth Science Information Network. [Mapa]. <https://hub.worldpop.org/geodata/summary?id=41011>

World Resources Institute. (2025). *One-third of forest lost this century is likely gone for good - and remaining loss carries lasting consequences, new analysis warns*. <https://acortar.link/VDvLQQ>

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Fondo Verde y a la Universidad centro Panamericano de Estudios Superiores (UNICEPES) por la oportunidad de desarrollar el doctorado en Paisaje y Ambiente. Además, a la oficina para Mesoamérica de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) por el desarrollo de la experiencia profesional a lo largo de los años.