

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la fragmentación de los ecosistemas se ha consolidado como una de las principales amenazas para la biodiversidad a nivel mundial. Factores como la expansión urbana, la intensificación agrícola y el desarrollo de infraestructura han favorecido la división de grandes extensiones forestales en fragmentos cada vez más pequeños, aislados y rodeados por matrices de uso del suelo diferentes a las originales. Este proceso no sólo reduce la superficie de hábitat disponible, sino que también altera la composición y configuración del paisaje, incrementando los bordes y disminuyendo las áreas núcleo, lo que genera condiciones adversas para la permanencia de la vegetación y de las especies que dependen de ella.

En México, los bosques de la región central han experimentado transformaciones profundas derivadas primero de la agricultura y, posteriormente, de la urbanización a gran escala. La Sierra de Las Cruces, al occidente de la Cuenca de México, constituye un ejemplo emblemático: desde mediados del siglo pasado sus bosques han sido fragmentados por procesos de deforestación y cambios de uso de suelo, lo que ha reducido su cobertura y comprometido su integridad ecológica. Aunque existen investigaciones sobre fragmentación y efectos de borde, los estudios enfocados en la conectividad y en el papel de la matriz dentro del funcionamiento de los ecosistemas aún son escasos, pese a que resultan fundamentales para entender la dinámica del paisaje y orientar acciones de conservación.

En este contexto, el presente proyecto tiene como propósito fortalecer el conocimiento sobre el estado de conservación de los bosques de la Sierra de Las Cruces mediante el análisis de la estructura espacial de los fragmentos forestales y, particularmente, de su conectividad ecológica. A través de herramientas de teledetección se busca identificar patrones de fragmentación, evaluar corredores y puntos críticos de conexión, y reconocer aquellos elementos del paisaje que favorecen o limitan la continuidad de los procesos ecológicos.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio se localiza en el noreste del Estado de México, en la vertiente norte de la Sierra de Las Cruces, con una extensión aproximada de 78270.6 ha. Esta sierra forma parte del Eje Neovolcánico Transversal y constituye un importante parteaguas que delimita tres de las principales cuencas del centro de México: Valle de México, río Lerma y río Balsas.

En el territorio se desarrollan diversos usos de suelo. En las zonas bajas con pendientes suaves predomina la agricultura de temporal anual y permanente, destinada principalmente al cultivo de maíz, frijol, cebada, avena y papa. En décadas recientes, el crecimiento urbano se ha expandido sobre estas superficies planas, extendiendo la periferia de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Históricamente, los bosques de la región han sido objeto de aprovechamiento para la subsistencia, mediante la extracción de leña, madera para construcción y producción de carbón. Sin embargo, a lo largo del siglo XX, la combinación entre la creciente demanda de recursos forestales y la presión demográfica hacia áreas rurales provocó un deterioro ambiental significativo, resultado tanto de la deforestación para habilitar suelos agrícolas como del uso intensivo de la madera en la producción de carbón vegetal.

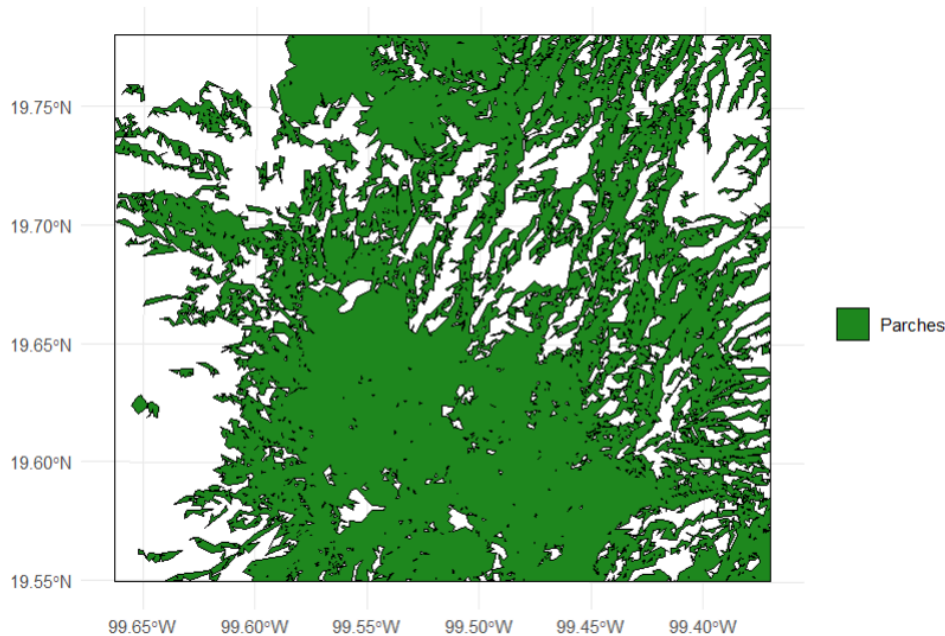


Figura 1. Área de Estudio

Procesamiento de imágenes

Para el año 1999 se empleó una imagen multiespectral HRVIR2 del satélite SPOT-2 (CNES), adquirida el 24 de enero, con resolución espacial de 20 m/píxel. La imagen, identificada con K-J: 587-311 y nivel de procesamiento 1A (sin corrección atmosférica ni geométrica), fue descargada del portal *SPOT World Heritage* del *Centre National d'Études Spatiales* (<https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/60>)

Análisis de fragmentación y conectividad

La caracterización de la fragmentación se llevó a cabo con el comando *Fragmentation Statistics* del paquete Makurhini (Godínez-Gómez y Correa, 2020) en RStudio. Composición del paisaje: número de parches. Configuración espacial: área de los parches, tamaño medio, área núcleo total, porcentaje de área núcleo, longitud de borde total, porcentaje y densidad de borde, índice de forma y dimensión fractal.

La fragmentación se evaluó mediante el Índice de Tamaño de Malla Efectivo (Effective Mesh Size, MESH) el cual cuantifica la probabilidad de que dos puntos seleccionados al azar se ubiquen en el mismo parche no fragmentado. Valores más bajos indican mayor nivel de fragmentación y menor probabilidad de conexión.

Complementariamente, se calculó el Índice de Probabilidad de Conectividad (PC; Saura y Pascual-Hortal, 2007), que estima la probabilidad de que dos individuos situados aleatoriamente en el paisaje se localicen en parches interconectados dentro de un conjunto de n fragmentos y sus enlaces funcionales, usando la paquetería de Makurhini. Se empleó una distancia de dispersión de 10,000 km.

RESULTADOS

Para el año 1999 en la sierra de las cruces se encontraba cubierta por 47,164 ha de parches de vegetación, teniendo una cantidad de 43 parches, de los cuales la media de tamaño es de 1,096 ha. El total de borde (considerando una distancia de 100m), es de 2,244.73 km.

Tabla 1. Métricas de fragmentación obtenidas para la cobertura de bosque en 1999.

Metric	Value
Patch area (ha)	47164.4654
Number of patches	43.0000
Size (mean)	1096.8480
Patches < minimum patch area	36.0000
Patches < minimum patch area (%)	2.9047
Total edge	2244.7980
Edge density	0.0476
Patch density	0.0549
Total Core Area (ha)	6284.2510
Cority	0.0233
Shape Index (mean)	0.3306
FRAC (mean)	0.9455
MESH (ha)	24742.3889

Dentro del área de estudio destaca un parche principal ubicado en la parte alta de la sierra, el cual concentra el mayor porcentaje de área núcleo, con valores superiores al 20% (figura 2). En contraste, los parches aledaños presentan núcleos de menor tamaño, lo que evidencia una mayor influencia del efecto de borde.

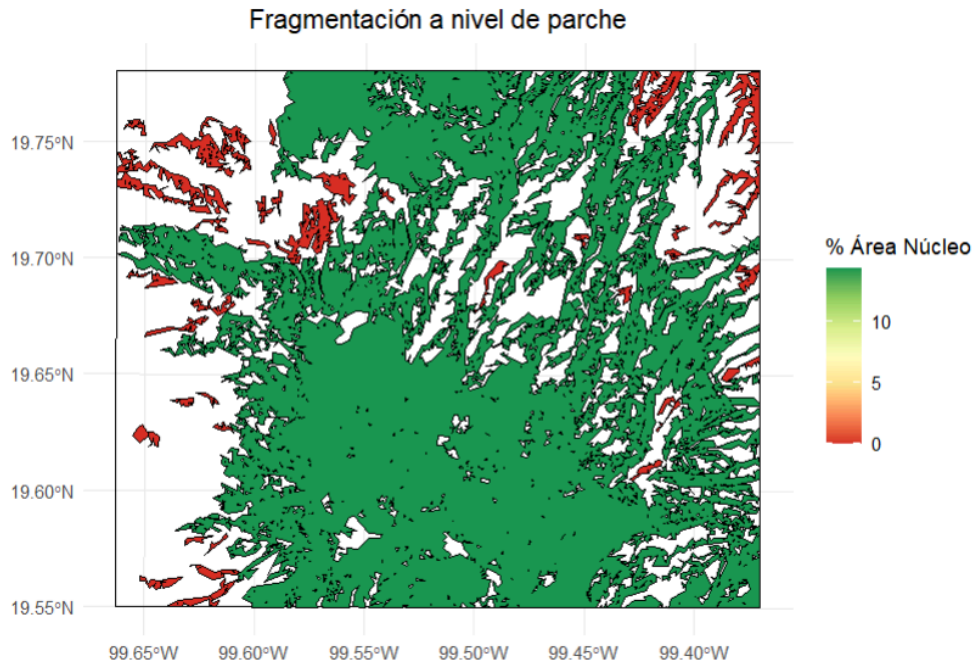


Figura 2. Métrica de porcentaje de área núcleo.

La métrica de la relación perímetro-área (PARA) indica que la mayoría de los parches dentro del área de estudio presentan formas complejas e irregulares, lo que sugiere un alto grado de fragmentación. Los parches con los valores más altos indican formas alargadas que en este caso se centran en el gran parche el cual tiene formas alargadas que evidencian la forma de las barrancas en las que se distribuye la vegetación. Por otro lado, los parches con valores medios se localizan principalmente en la periferia del área de estudio.

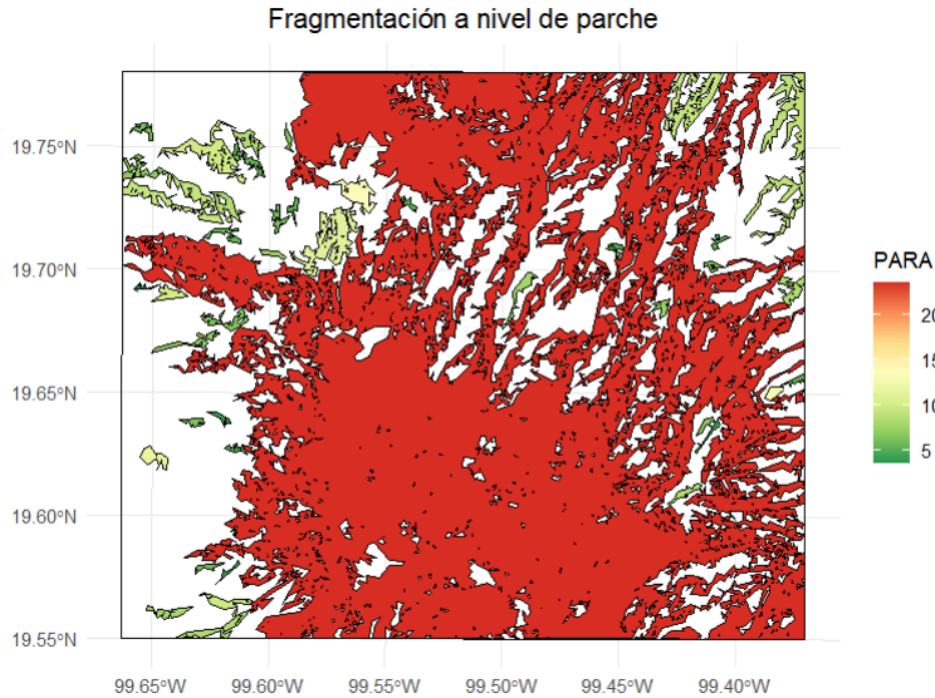


Figura 3. Métrica de la relación perímetro-área (PARA).

Respecto al grado de fragmentación, la métrica MESH o también el índice del tamaño de malla efectivo (Effective Mesh Size), indicó que 24,742.38 ha corresponden a hábitat no fragmentado, por lo que el 31.61% del área de estudio presenta algún grado de fragmentación, las áreas con valores más bajos se encuentran al poniente.

CONECTIVIDAD

El mapa del índice de Probabilidad de Conectividad (dPC) muestra que en el área de estudio predominan valores elevados, de acuerdo con la clasificación de Jenks, dentro del rango de 0.60 a 99.81%. Sin embargo, para 1999 se registró una media de conectividad del 2.4%, lo que indica un nivel de conectividad generalmente bajo en el paisaje.

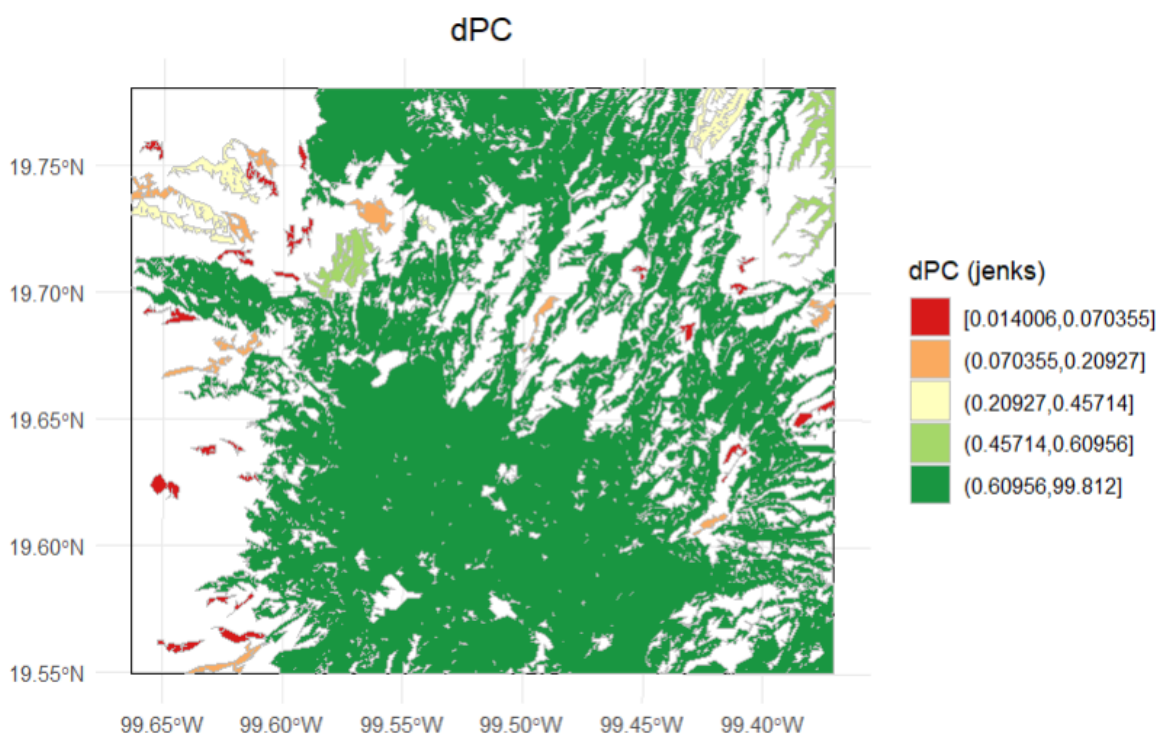


Figura 4. Probabilidad de Conectividad (PC) para el área de estudio en 1999.

Tabla 2. Probabilidad de Conectividad (PC) para el área de estudio en 1999.

Año	dIIC	dIICintra	dIICflux	dIICconne c
1999	2.435	2.224	0.204	0.316

DISCUSIÓN

En 1999, el área de estudio presentaba una cobertura superior al 60% de vegetación boscosa (47,164 ha). Sin embargo, más del 30% de esta superficie mostró evidencias de fragmentación de acuerdo con el índice MESH. Aunque existía un parche principal de gran extensión en la parte alta de la Sierra de Las Cruces, se identificaron numerosos fragmentos aledaños de menor tamaño, varios de ellos por debajo de la media (1,096 ha).

Si bien se ha documentado que los fragmentos pequeños pueden albergar mayor riqueza y abundancia de especies (Hernández-Ruedas et al., 2014), también tienden a presentar limitaciones ecológicas. Entre ellas destacan la dominancia de unas pocas especies, la intensificación de la competencia intra e interespecífica, y, en algunos casos, la reducción de la variabilidad genética debido al aislamiento poblacional (Hilty et al., 2006). Por estas razones, se considera que la persistencia de grandes extensiones boscosas es fundamental para contrarrestar los efectos de la fragmentación, ya que favorecen la movilidad de especies, reducen el aislamiento y proporcionan un hábitat más estable (Fletcher et al., 2018).

La proliferación de fragmentos pequeños incrementa a su vez la proporción de áreas de borde (Slattery y Fenner, 2021). Este fenómeno disminuye la superficie de áreas núcleo y expone los fragmentos a condiciones externas más intensas, lo que puede alterar los procesos ecológicos internos. En este sentido, el índice de forma obtenido en 1999 mostró que predominaron parches irregulares y complejos (valores >1), reflejo de un patrón de fragmentación asociado principalmente a la expansión agrícola y la deforestación de las décadas de 1970 (Granados et al., 2014).

En cuanto a la conectividad, el gran parche de vegetación jugó un papel central al extenderse sobre gran parte del área de estudio, funcionando como un núcleo ecológico con capacidad para facilitar el movimiento de fauna y la dispersión de flora. Estos fragmentos mayores, además, constituyen un soporte esencial para mantener la viabilidad genética de diversas poblaciones (Davies y Pullin, 2007). No obstante, también se identificaron parches aislados, los cuales, aunque contribuyen marginalmente a la conectividad estructural, representan áreas clave para estrategias de restauración (p. ej., reforestación o enriquecimiento con especies nativas) con el fin de reducir el aislamiento y potenciar la conectividad funcional.

El índice de Probabilidad de Conectividad (dPC) reveló valores muy bajos en el área de estudio. Este patrón contrasta con lo observado en otros contextos, como el caso de la Meseta Purépecha en Michoacán, donde se han reportado valores altos de dPC en

bosques templados con mayor cobertura y menor fragmentación, considerando distintas distancias de dispersión (0.5, 5 y 10 km; Molina et al., 2019). La diferencia entre ambos casos puede explicarse por el tamaño del área analizada y el patrón de fragmentación: mientras que la Sierra de Las Cruces abarca una superficie de 782.71 km², dominada por un gran parche y fragmentos periféricos pequeños, la Meseta Purépecha comprende 6,150 km² con varios fragmentos grandes que fortalecen la conectividad.

De acuerdo con Saura et al. (2011), valores bajos de dPC suelen presentarse en paisajes donde predominan fragmentos pequeños en proporción al área total. Aunque en este estudio el parche principal representa cerca del 50% de la superficie, la abundancia de parches menores contribuye a disminuir la conectividad general. Es importante señalar que el aumento de la cobertura forestal no implica necesariamente un incremento lineal en la conectividad. La creación de nuevos parches puede tener efectos divergentes: en algunos casos incrementa la disponibilidad de hábitat, mientras que en otros refuerza el aislamiento, dependiendo de la dispersión de las especies y la permeabilidad del paisaje (Rudnick et al., 2012).

En el caso de las especies vegetales, la dispersión suele ser limitada y depender de vectores animales, particularmente insectos, los cuales tienen rangos de movilidad reducidos y enfrentan barreras significativas en paisajes fragmentados (Rudnick et al., 2012). Esta condición acentúa la vulnerabilidad de los fragmentos pequeños y aislados, y subraya la necesidad de considerar la conectividad funcional —más allá de la estructural— en las estrategias de conservación.

El análisis de años anteriores resulta fundamental para comprender la dinámica histórica de la fragmentación y la conectividad del paisaje, ya que permite identificar tendencias, tasas de cambio y momentos críticos en los procesos de pérdida o recuperación de la cobertura forestal. Estos antecedentes ofrecen un marco de referencia para evaluar cómo las actividades humanas y los factores naturales han modificado la estructura espacial de los ecosistemas a lo largo del tiempo, lo cual es esencial para proyectar escenarios futuros,

establecer prioridades de conservación y diseñar estrategias más eficaces de restauración y manejo del territorio.

REFERENCIAS

- Davies, Z.G., y Pullin, S.A. (2007). Are hedgerows effective corridors between fragments of woodland habitat? An evidence-based approach. *Landscape ecology* 22: 333-351.
- Fletcher, R.J., Didham, R.K., Banks-Leite, C., Barlow, J., Ewers, M.R., Rosindell, R.M., Holt, R.D., Gonzalez, A., Pardini, R., Damschen, E.I., Melo, F.P.L., Ries, L., Prevedello, J.A., Tscharntke, T., Laurance, W.F., Lovejoy, T. y Haddad, N.M. (2018). Is habitat fragmentation good for biodiversity? *Biological Conservation*. 226: 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.022>
- Granados, C., Serrano, G.D. y García-Romero, A. (2014). Efecto de borde en la composición y en la estructura de los bosques templados. Sierra de Monte-Alto, Centro de México. *Caldasia*. 36(2): 269-287.
- Hernández-Ruedas, M.A., Arroyo-Rodríguez, V., Meave, J.A., Martínez-Ramos, M.N., Ibarra-Manríquez, G., Martínez, E., Jamangapé, G., Melo, F.P.L. y Santos, B.S. (2014). Conserving Tropical Tree Diversity and Forest Structure: The Value of Small Rainforest Patches in Moderately-Managed Landscapes. *PLOS ONE* (6): e98931. doi:10.1371/journal.pone.0098931
- Hilty, A.J., Lidicker, Z.W. y Merenlender, M.A. (2006). *Corridor Ecology The science and practice of linking landscape for biodiversity conservation*. Island press. Washington. ISBN 1-55963-047-7
- Molina, S.A., Delgado, P., González-Rodríguez, A., González, C., Gómez-Tagle, R.A.F. y López-Toledo, L. (2019). Spatio-temporal approach for identification of critical conservation areas: a case study with two pine species from a threatened temperate forest in Mexico. *Biodiversity and Conservation*. 28: 1863-1883.
- Rudnick, D., Ryan, S.J., Beier, P., Cushman, S.A. y Dieffenbach, F. (2012). The role of Landscape Connectivity in Planning and Implementing Conservation and Restoration Priorities. *Issues in Ecology*. Ecological Society of America 16. Washington D.C.
- Saura, S., Estreguil, C., Mouton, C., Rodríguez-Freire, M. (2011). Network analysis to assess landscape connectivity trends: Application to European forests (1990–2000). *Ecology indicators*. 11: 407-416. doi:10.1016/j.ecolind.2010.06.011

Slattery, Z. y Fenner, R. (2021). Spatial Analysis of the Drivers, Characteristics, and Effects of Forest Fragmentation. Sustainability.1, 3246. <https://doi.org/10.3390/su13063246>