

## **Trabajo Final**

**Proyecto de Ecología del Paisaje: Análisis de la Conectividad  
Funcional del Hábitat de *Leopardus pardalis* en la Sierra Norte de  
Puebla, México, utilizando el paquete Makurhini en R**

**Presenta:**

**Lemus Rincón Sergio**

## 1. Introducción

La creciente presión antropogénica sobre los ecosistemas naturales ha provocado una alarmante pérdida y fragmentación del hábitat a nivel global, impactando severamente la biodiversidad y los procesos ecológicos esenciales (Foley et al., 2005; Fahrig, 2003). En México, esta problemática se manifiesta de manera crítica en regiones de alta biodiversidad, como la Sierra Norte de Puebla (SNP), donde se ha documentado una reducción del 30% del hábitat de especies clave como el ocelote (*Leopardus pardalis*) en las últimas dos décadas (CONABIO, 2013). Este fenómeno, impulsado por el incremento de la población humana y la expansión agrícola, no solo disminuye la disponibilidad de espacios adecuados para la fauna, sino que también compromete la conectividad entre los fragmentos de hábitat remanentes, generando un aislamiento que amenaza la viabilidad poblacional de numerosas especies, particularmente los carnívoros (Cossíos et al., 2012; Riojas-López et al., 2019).

El ocelote (*Leopardus pardalis*), un mesodepredador crucial en los ecosistemas neotropicales, desempeña un rol ecológico fundamental en la regulación de presas y en la dinámica de las comunidades de carnívoros menores (de Oliveira et al., 2010; Vera, 2016). Su estatus de conservación, con subpoblaciones como *L. pardalis sonoriensis* en peligro de extinción en México, subraya la urgencia de comprender y mitigar los impactos de la fragmentación del paisaje. La conectividad funcional, que describe cómo la estructura del paisaje facilita o restringe el movimiento de las especies, el flujo genético y la dinámica poblacional, emerge como un concepto central en la planificación de la conservación (Carroll et al., 2012; McRae y Beier, 2007). La identificación de corredores biológicos y la priorización de áreas clave son estrategias esenciales para mantener poblaciones viables y permitir la adaptación de las especies a cambios ambientales, incluyendo el cambio climático (Rudnick et al., 2012).

Este estudio se enmarca en la necesidad de profundizar en el análisis de la conectividad funcional del hábitat del ocelote en la Sierra Norte de Puebla. Utilizando el paquete *Makurhini* en R, se busca aplicar y comparar metodologías de análisis de conectividad y fragmentación, complementando los hallazgos previos obtenidos con otras herramientas. El desarrollo de un modelo robusto de conectividad permitirá no solo comprender los patrones de distribución y la disponibilidad de hábitats para *L. pardalis*, sino también evaluar la permeabilidad de la matriz del paisaje y proponer estrategias de manejo y conservación más efectivas.

## Hipótesis

Se espera que la matriz del paisaje en la Sierra Norte de Puebla, debido al cambio de uso de suelo, ejerza un alto grado de resistencia que afecte negativamente la conectividad funcional del área de estudio, incrementando la distancia de las rutas de mínimo costo.

Asimismo, se hipotetiza que, a pesar de la presencia de fragmentos de hábitat remanente, su contribución a la conectividad general del paisaje será limitada, lo cual será evidenciado y cuantificado de manera más precisa mediante la aplicación de un conjunto diverso de índices de conectividad y fragmentación disponibles en el paquete Makurhini.

## 2. Metodología

### 2.1. Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la Sierra Norte de Puebla (SNP), ubicada en el centro-este de México. Geográficamente, limita al norte y este con el estado de Veracruz, al sur con la región de los llanos de San Juan (municipios de Libres y Tepeyahualco), al oeste con el estado de Hidalgo y al suroeste con el estado de Tlaxcala (INEGI, 2005). Esta región forma parte de tres provincias morfotectónicas principales: la Sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico y la Llanura Costera del Golfo. La Sierra Norte de Puebla se extiende a través de diversas sierras como Zacapoaxtla, Huauchinango, Teziutlán, Tetela de Ocampo, Chignahuapan y Zacatlán, presentando un amplio gradiente altitudinal que varía desde los 0 hasta los 3400 metros sobre el nivel del mar (msnm), con picos que alcanzan los 4282 msnm.

La diversidad geomorfológica de la SNP se traduce en una amplia gama de climas, predominando los templados, seguidos por los cálidos y semicálidos (CONABIO, 2011). Las temperaturas están fuertemente influenciadas por la altitud, con promedios superiores a 24°C en áreas por debajo de los 1000 msnm y entre 2°C y 4°C por encima de los 4000 msnm. Hidrográficamente, la región cuenta con seis cuencas principales: Río Tuxpan, Río Cazones, Río Nautla, Río Tecolutla, Río Moctezuma y Región Pánuco. Los suelos son variados, con 21 unidades edáficas, donde la clase textural media es la más común (65%) (IUSS, 2007).

La cubierta vegetal de la Sierra Norte de Puebla, según el mapa de uso de suelo y vegetación de INEGI serie VI (2016) y agrupaciones realizadas por Guerrero (2022), incluye 12 tipos de cobertura: agricultura, agroforestal, asentamientos humanos, bosque de coníferas, bosque de encino, bosque de pino-encino, bosque mesófilo, cuerpo de agua, zona desprovista de vegetación, pastizal inducido, selva baja caducifolia y vegetación secundaria. Esta heterogeneidad paisajística es fundamental para el estudio de la conectividad del hábitat del ocelote.

### 2.2. Tipo de Datos Utilizados

Para este estudio, se utilizarán los datos espaciales y de ocurrencia de la especie previamente recopilados y procesados, los cuales incluyen:

Registros de Ocurrencia de *Leopardus pardalis*: Un total de 17 registros georreferenciados obtenidos de bases de datos como el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de CONABIO, Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y "Neotropical Carnivores: A data set on carnivore distribution in the Neotropics" (Nagy-Reis et al., 2020). Estos registros se distribuyen principalmente en los municipios de Hueytamalco, Hueytlalpan y Xicotepec, asociados a vegetación tropical, pastizales, áreas agrícolas y urbanas.

Imágenes de Satélite: Datos de Landsat (TM+, enero de 2003) utilizados para la clasificación de coberturas.

Modelo de Elevación Digital (DEM): Generado a partir de curvas de nivel del INEGI (2016).

Mapas de Uso del Suelo y Vegetación: Serie III, escala 1:250,000 (INEGI, 2005).

Mapas Topográficos y de División Política: Escala 1:250,000 (INEGI, 2019).

Variables Bioclimáticas: Las 19 variables de World Clim (Hijmans et al., 2005) que fueron utilizadas para el modelado de distribución potencial del ocelote.

Mapas de Aptitud de Hábitat y Resistencia del Paisaje: Generados a partir de la integración de las variables mencionadas, con valores de aptitud y resistencia asignados a diferentes tipos de cobertura, elevación, pendiente, distancia a carreteras, densidad de carreteras, distancia a asentamientos humanos y densidad poblacional. Estos mapas son cruciales para la implementación en Makurhini.

### 2.3. Índices de Conectividad y Fragmentación Seleccionados

Para este análisis, se seleccionarán y calcularán los siguientes índices de conectividad y fragmentación, utilizando el paquete Makurhini en R, con el fin de obtener una comprensión integral del paisaje para *Leopardus pardalis*:

Índices de Fragmentación:

Número de Fragmentos (NP): Cuantifica el número total de parches de hábitat identificados en el paisaje. Este índice es fundamental para evaluar el grado de división del hábitat.

Tamaño Promedio de los Fragmentos (MPS): Representa la superficie media de los parches de hábitat. Proporciona una medida directa de la extensión de los fragmentos disponibles para la especie.

Densidad de Bordes (ED): Mide la longitud total de los bordes del hábitat por unidad de área. Un valor alto de ED indica una mayor exposición a los efectos de borde, que pueden ser perjudiciales para especies sensibles a la perturbación.

Índices de Conectividad Integral:

Índice de Conectividad Integral (IIC) y sus fracciones (dIIC, dIICintra, dIICflux, dIICconnector, dIICrest): El IIC es una medida global de la conectividad que considera tanto el área de los fragmentos como la facilidad de movimiento entre ellos. Sus fracciones permiten desagregar la contribución de cada fragmento:

dIIC: Importancia general de un fragmento para la conectividad.

dIICintra: Contribución de la conectividad interna de un fragmento.

dIICflux: Contribución de un fragmento como paso para el flujo entre otros fragmentos.

dIICconnector: Contribución de un fragmento como conector directo entre otros.

dIICrest: Contribución residual.

Índice de Probabilidad de Conectividad (PC) y sus fracciones (dPC, dPCintra, dPCflux, dPCconnector, dPCrest): Similar al IIC, el PC mide la probabilidad de que dos puntos aleatorios en el paisaje estén interconectados. Sus fracciones ofrecen una descomposición análoga a las del IIC, proporcionando una visión detallada de la importancia de cada fragmento en términos de probabilidad de conexión.

Índices de Conectividad Basados en Área:

Equivalent Connected Area (ECA) y dECA: ECA es una métrica intuitiva que expresa la conectividad del paisaje como el tamaño de una única área de hábitat que, si estuviera completamente conectada, proporcionaría el mismo nivel de conectividad que el paisaje real. dECA cuantifica la pérdida de ECA si un fragmento específico fuera eliminado, indicando su importancia para la conectividad general.

Justificación de la Elección: La selección de estos índices se justifica por su capacidad para proporcionar una evaluación multidimensional de la conectividad del paisaje, superando las limitaciones de un análisis unidimensional. Los índices de fragmentación ofrecerán una base estructural del paisaje. Los índices de centralidad permitirán identificar los fragmentos más estratégicos para el movimiento del ocelote, revelando posibles "puntos calientes" o "cuellos de botella" que requieren atención prioritaria. El IIC y el PC, junto con sus fracciones, son esenciales para comprender la contribución específica de cada fragmento a la conectividad global y el flujo de dispersión. Finalmente, el ECA proporcionará una métrica de fácil interpretación para comunicar la "cantidad efectiva de hábitat conectado", lo cual es fundamental para la toma de

decisiones en conservación. La combinación de estos índices permitirá una comparación robusta con los resultados previos de la tesis, validando y enriqueciendo la interpretación ecológica de la conectividad del hábitat del ocelote en la Sierra Norte de Puebla.

#### 2.4. Parámetros y Configuraciones Aplicadas

Los parámetros y configuraciones para el análisis se basarán en los métodos detallados en la tesis original, adaptados para su implementación en el entorno de R con el paquete Makurhini.

##### **Modelado de Distribución Potencial y Aptitud de Hábitat:**

Los mapas de distribución potencial de *L. pardalis* (valores de 0 a 1, donde 1 indica alta idoneidad) se obtuvieron utilizando 19 variables bioclimáticas de World Clim y registros de ocurrencia de la especie. El umbral de corte para definir la presencia/ausencia fue el "10 percentil training presence".

La aptitud de hábitat se clasificó en tres categorías: deficiente (0-30), subóptimo (30-60) y óptimo (60-100), integrando la distribución potencial con coberturas reclasificadas y variables de disturbio (pendiente, elevación, distancia a carreteras, densidad de carreteras, distancia a asentamientos humanos). La fórmula de álgebra de mapas utilizada fue:  $2 * (HabP + HabA) + (DC + DensC + DAH + Elev + Pend)$ .

Los fragmentos de hábitat óptimo se definieron como aquellos con una superficie mayor a 2000 ha. Los fragmentos óptimos más pequeños y los subóptimos se considerarán como "fragmentos de paso" o con menor calidad de hábitat en el análisis de resistencia.

##### **Valoración del Grado de Resistencia del Paisaje**

La capa de resistencia del paisaje se construirá asignando valores de 0 (baja resistencia) a 100 (alta resistencia) a cada píxel, basándose en el tipo de cobertura, elevación, pendiente, distancia a carreteras, densidad de carreteras, densidad de poblaciones y distancia a poblados. Los valores específicos de resistencia para cada categoría de estas variables, tal como se definieron en la tesis, serán utilizados para generar la capa de resistencia. Por ejemplo, asentamientos humanos y carreteras pavimentadas de 4 carriles tendrán los valores de resistencia más altos.

##### **Cálculo de Rutas de Mínimo Costo (LCP)**

Se utilizará la capa de resistencia generada para calcular las rutas de mínimo costo entre los fragmentos de hábitat óptimo. Esto implicará la identificación de los caminos con menor "costo" acumulado para el movimiento del ocelote.

## **Configuración de Índices de Conectividad en Makurhini**

Para los índices IIC, PC y ECA, se definirá un umbral de dispersión adecuado para *L. pardalis*. Aunque la tesis no especifica un umbral de dispersión único para los índices, se utilizarán las distancias de las rutas de mínimo costo y la información sobre el ámbito hogareño del ocelote (machos adultos: 1-17.7 km<sup>2</sup>, hembras: 0.7-10.0 km<sup>2</sup>) para establecer un rango de distancias de dispersión que Makurhini pueda utilizar para definir las conexiones entre fragmentos. Se considerará la distancia media de costo de las rutas de mínimo costo (1600 km en la tesis) como un indicador de la resistencia acumulada, y se explorarán diferentes umbrales de distancia euclidiana para la conectividad (por ejemplo, basados en el promedio de 9.42 km de distancia euclidiana entre fragmentos).

Las fracciones de IIC y PC (intra, flux, connector, rest) se calcularán para evaluar la contribución específica de cada fragmento a la conectividad.

Para los índices de fragmentación (NP, MPS, ED) y centralidad (Degree, BWC), se aplicarán las funciones correspondientes de Makurhini directamente sobre los mapas de hábitat binarios (óptimo/no óptimo) y la red de conectividad generada.

## **Resultados**

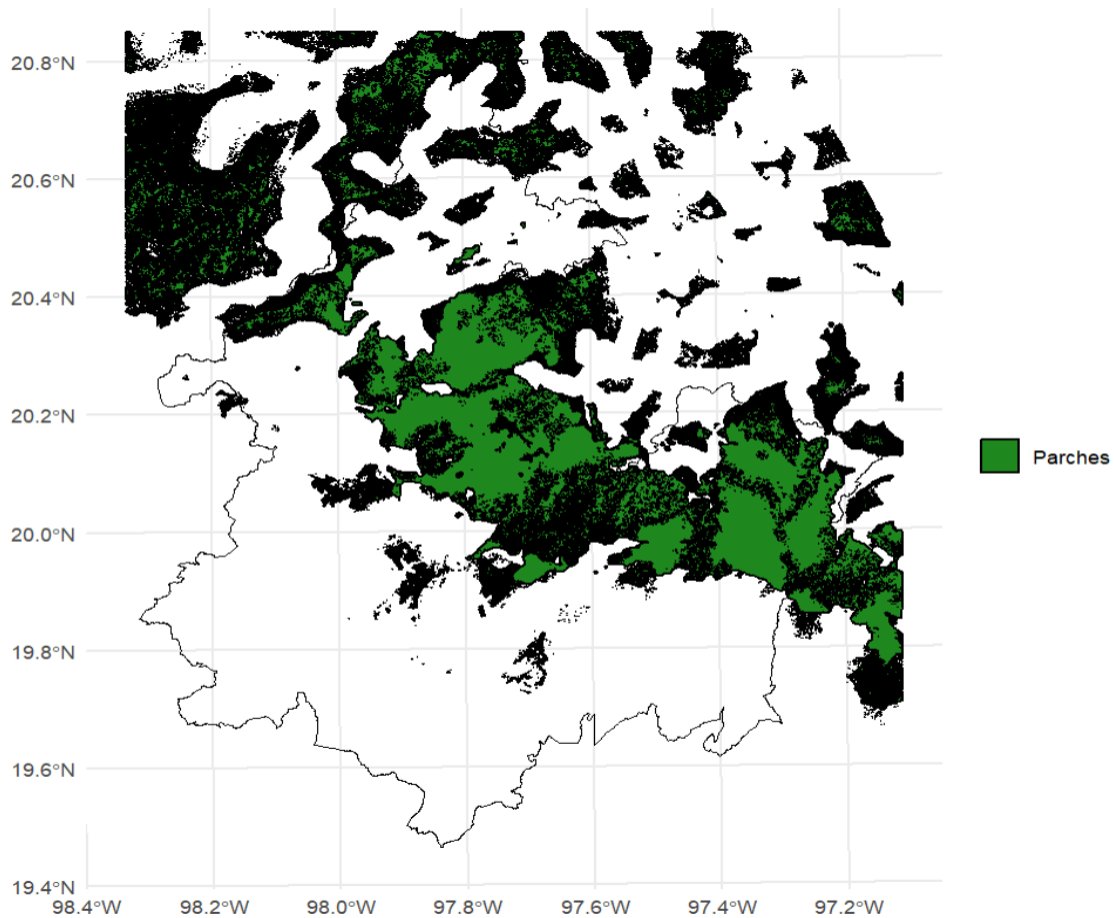


Imagen 1

1.-Área total de parches: 417,473 ha.

- Representa la superficie total del paisaje clasificado como hábitat.
- Es un valor alto, pero el desglose muestra que está compuesto por muchísimos parches pequeños.

2.- Número de parches: 81,024.

- Esto indica altísima fragmentación: el paisaje está dividido en miles de fragmentos diminutos en lugar de grandes bloques de hábitat.

3. -Tamaño medio de parche (5.15 ha).Muy bajo.

- El hábitat está atomizado en fragmentos que difícilmente soportarían poblaciones viables de muchas especies de mamíferos medianos/grandes.



4.-Parches menores al área mínima ( $80,933 = 99.9\%$ ).

- Prácticamente todos los fragmentos están por debajo del umbral ecológico definido ( $\text{min\_node\_area}$ ).
- Esto implica que el hábitat funcional real es casi inexistente.

5.-Área núcleo total ( $69,786 \text{ ha} \approx 17\%$  del área de parches).

- Significa que la mayor parte del hábitat está dominado por efectos de borde.
- Solo una fracción pequeña tiene condiciones de núcleo.

6.-Cority = 0.0001.

- Indica que la proporción de núcleo respecto al área total es prácticamente nula.
- Esto confirma que los fragmentos carecen de zonas interiores significativas.

7.-MESH ( $79,338 \text{ ha}$ ).

- La conectividad efectiva es muy baja considerando el área total.
- El valor refleja que, en términos prácticos, solo quedarían unos pocos “parches equivalentes grandes”.

8.- Shape Index medio ( $0.1358$ ) y FRAC = -inf.

El Shape Index muestra geometrías relativamente compactas en promedio. El FRAC aparece con errores numéricos (-inf) → esto indica problemas en el cálculo por parches muy pequeños (áreas casi puntuales que distorsionan el índice).

Área de borde

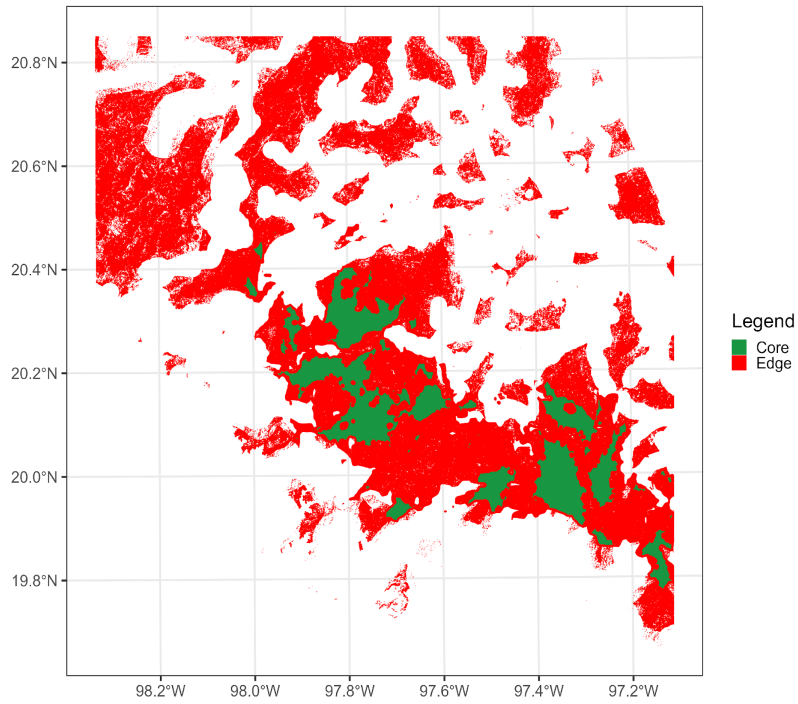


Imagen 2

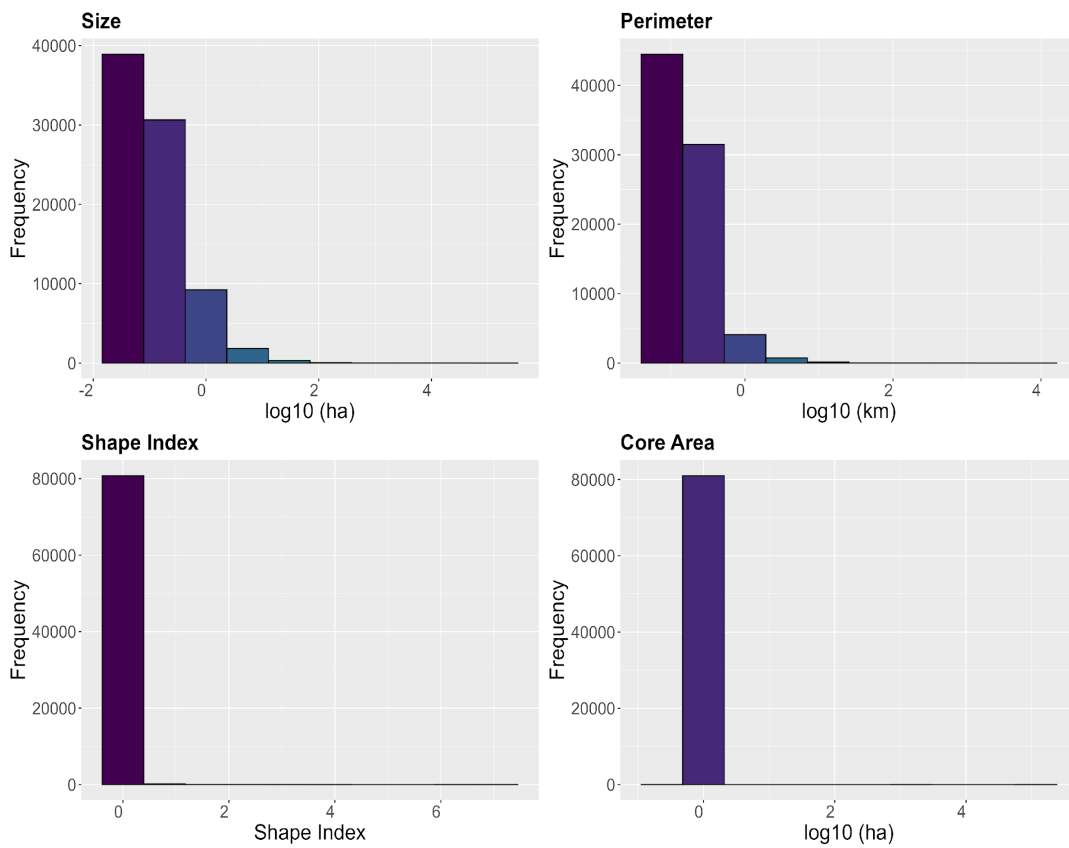


Imagen 3

Métricas del paisaje:

Tabla 1

IdTemp	Area	CA	CAPercent	Perimeter	EdgePercent	PARA	ShapeIndex
1	0.0584	0	0	0.113	100	0.5168	0.131
2	0.1272	0	0	0.164	100	0.7756	0.129
3	0.0912	0	0	0.121	100	0.7537	0.11
4	0.0912	0	0	0.121	100	0.7537	0.11
5	0.0584	0	0	0.113	100	0.5168	0.131
6	0.0584	0	0	0.113	100	0.5168	0.131
7	0.2736	0	0	0.242	100	1.1306	0.130
8	0.0584	0	0	0.113	100	0.5168	0.131
9	0.0584	0	0	0.113	100	0.5168	0.131
10	0.0912	0	0	0.121	100	0.7537	0.11
11	0.0912	0	0	0.121	100	0.7537	0.11
12	0.0912	0	0	0.121	100	0.7537	0.11
13	0.0912	0	0	0.121	100	0.7537	0.11
14	0.0584	0	0	0.113	100	0.5168	0.131
15	0.1272	0	0	0.164	100	0.7756	0.129

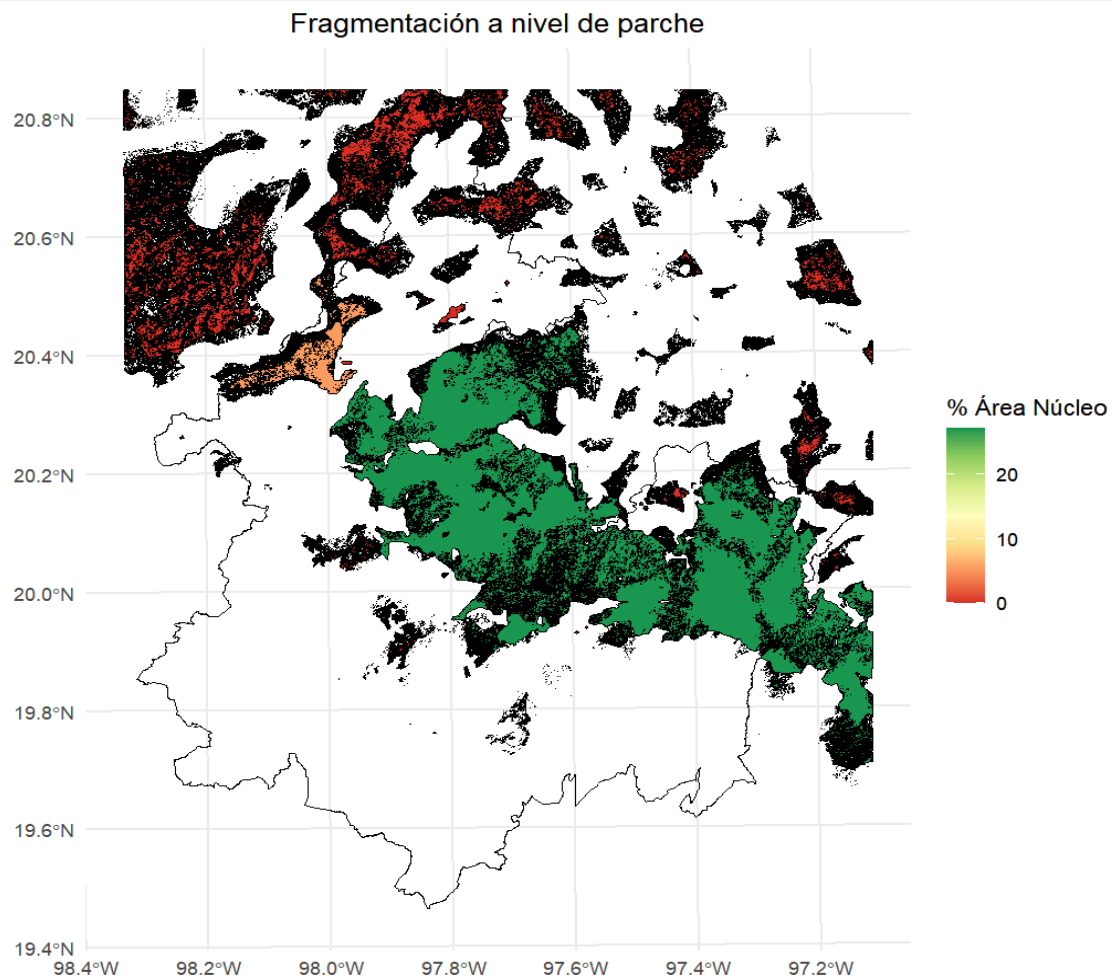


Imagen 4

### Fragmentación a nivel de parche

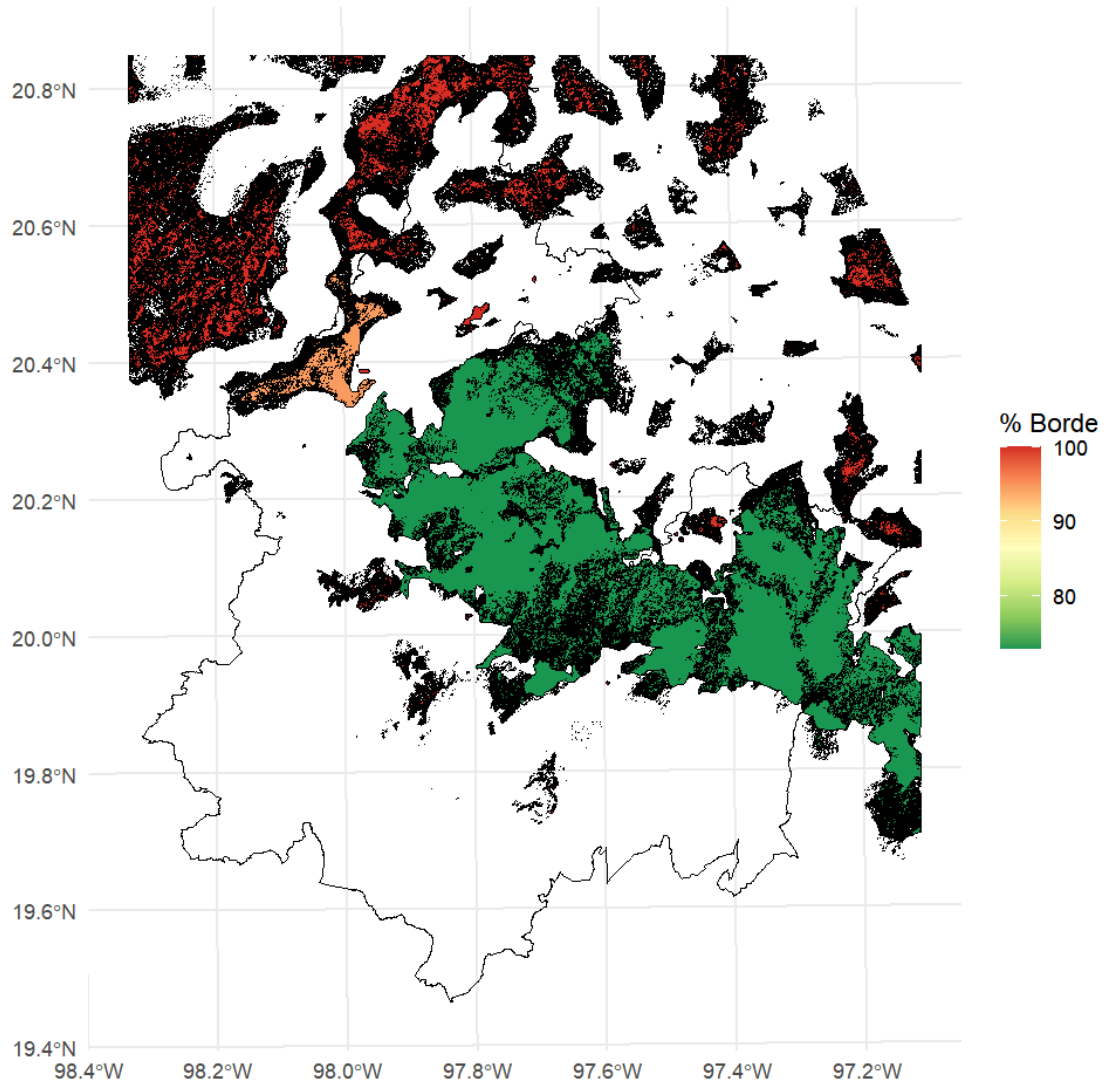


Imagen 5

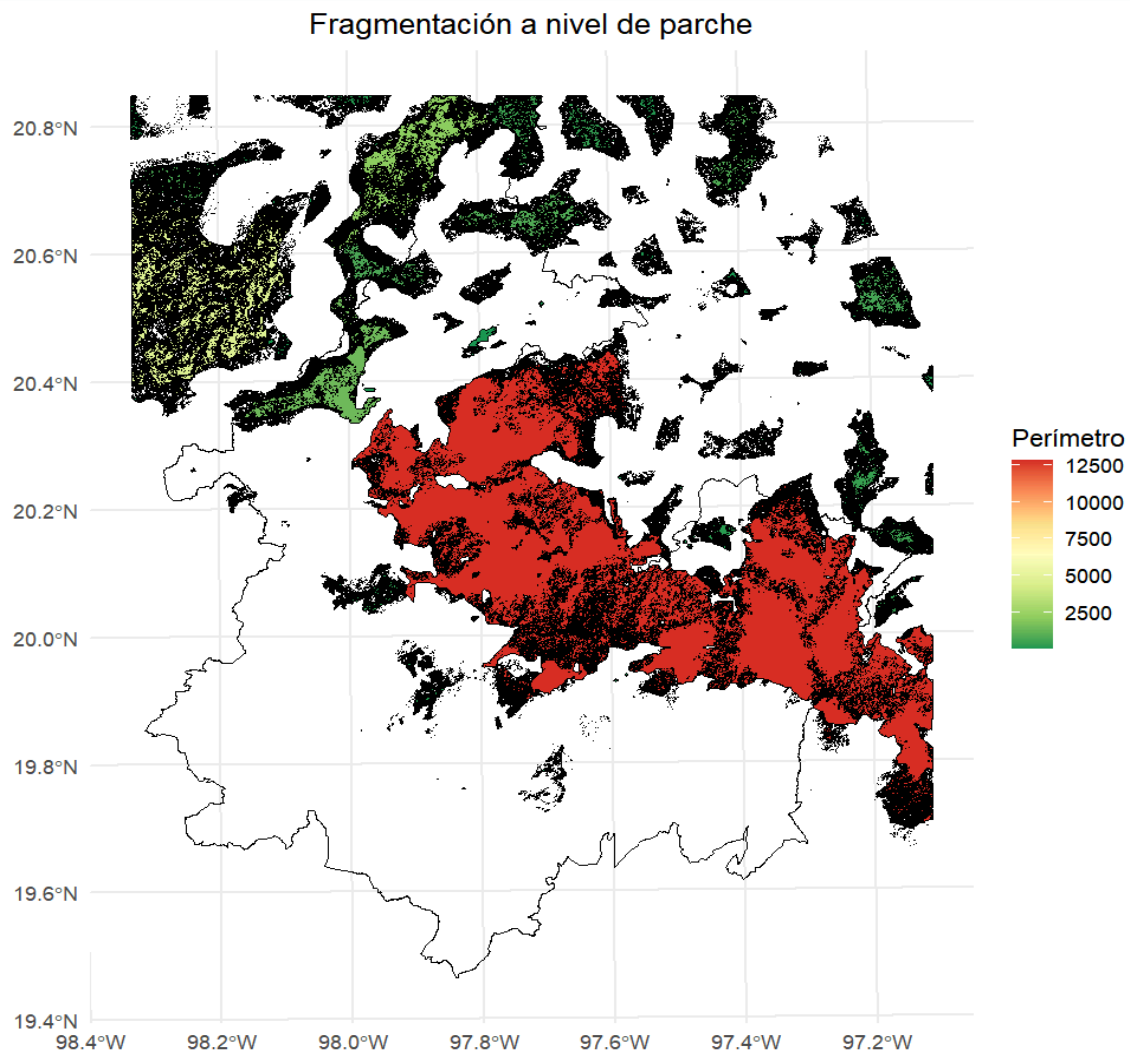


Imagen 6

Fragmentación a nivel de parche

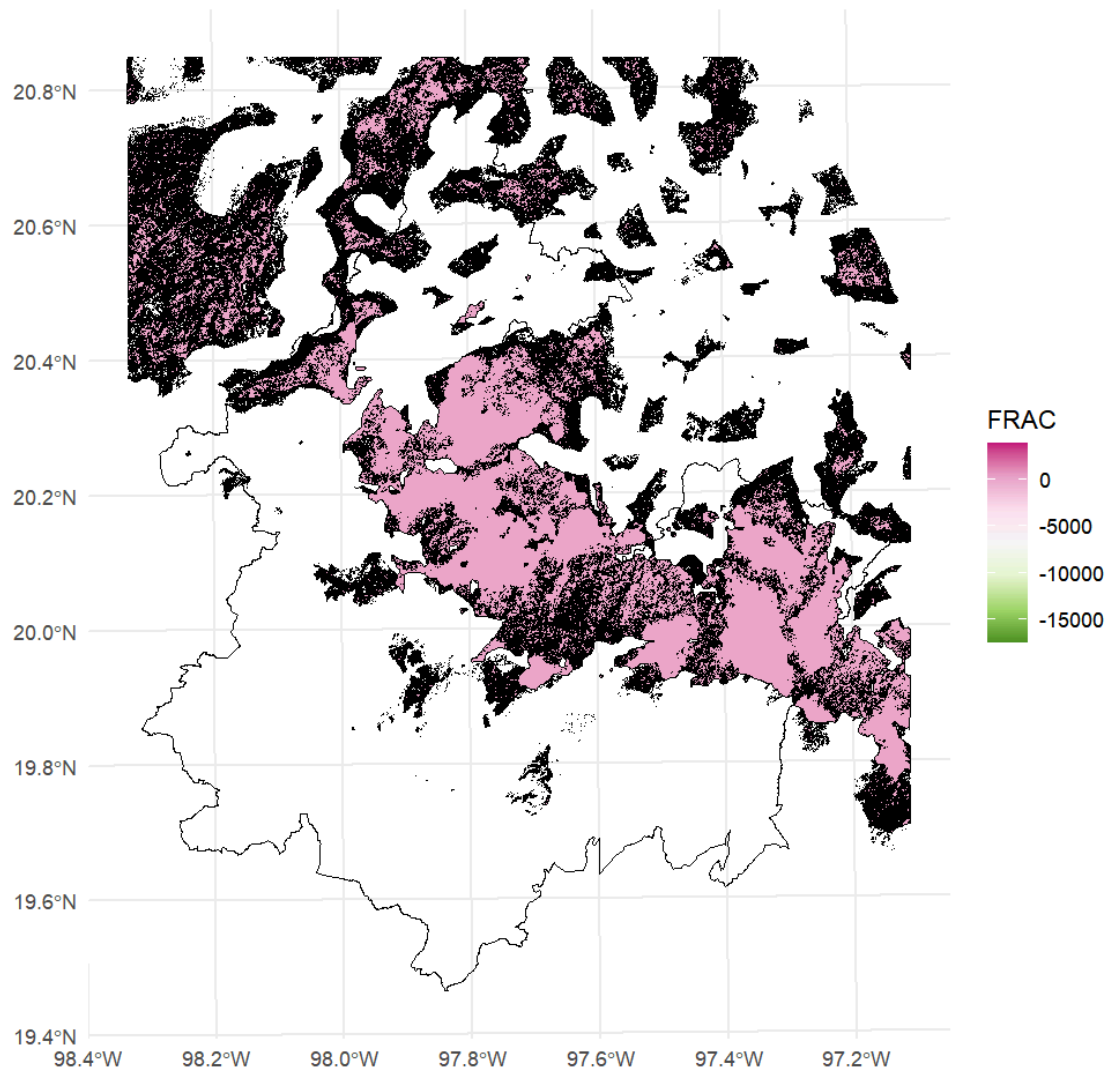


Imagen 7

Estadísticos a nivel de paisaje

Metric	Value
Patch area (ha)	417473.2644
Number of patches	81024.0000
Size (mean)	5.1525
Patches < minimum patch area	80933.0000
Patches < minimum patch area (%)	7.6381

Metric	Value
Total edge	49230.3080
Edge density	0.1179
Patch density	9.5613
Total Core Area (ha)	69786.1369
Cority	0.0001
Shape Index (mean)	0.1358
FRAC (mean)	-Inf
MESH (ha)	79337.6269

Tabla 2

> mesh\_percentage 90.63765

Edge.distance	Type	Percentage
1	100 Core Area	8.588863e-03
2	100 Edge	9.999141e+01
3	250 Core Area	1.175660e-03
4	250 Edge	9.999882e+01
5	400 Core Area	4.973242e-04
6	400 Edge	9.999950e+01

Tabla 3



## Discusión

Los resultados obtenidos a partir de las métricas de fragmentación y conectividad calculadas con el paquete Makurhini reflejan un escenario crítico para el hábitat de *Leopardus pardalis* en la Sierra Norte de Puebla. La elevada cantidad de fragmentos (81,024) y el tamaño medio extremadamente reducido (5.15 ha) indican un paisaje altamente atomizado, en el cual la mayoría de los parches no alcanzan la superficie mínima para sostener poblaciones viables de mamíferos de tamaño medio a grande. Este patrón confirma los efectos negativos de la transformación del paisaje reportados en estudios previos (Fahrig, 2003; Cossíos et al., 2012).

El análisis de área núcleo (Core Area) y el índice de Cority muestran que solo una fracción mínima del hábitat mantiene condiciones interiores sin influencia significativa de los bordes. Esto implica que gran parte del paisaje está dominado por los efectos de borde, lo cual incrementa la vulnerabilidad de las especies a la perturbación humana y a la presión de depredadores oportunistas, así como a la invasión de especies exóticas.

En cuanto a las métricas de conectividad funcional, valores bajos de MESH y la alta proporción de fragmentos por debajo del área mínima de nodo sugieren que la conectividad estructural no se traduce en conectividad efectiva. Es decir, aunque existen muchos fragmentos, la mayoría no cumple un papel relevante en el sostenimiento de flujos ecológicos.

La fragmentación extrema observada está relacionada principalmente con la expansión agrícola y el crecimiento de asentamientos humanos, factores que incrementan la resistencia de la matriz del paisaje. En este sentido, los resultados coinciden con lo reportado por Riojas-López & López-González (2019), quienes destacaron la pérdida de continuidad del hábitat del ocelote en la región.

Finalmente, el hecho de que la mayoría de los fragmentos identificados no superen el área mínima de nodo resalta la necesidad de establecer corredores de restauración que aumenten la conectividad entre los pocos fragmentos de mayor tamaño y calidad. La priorización espacial derivada de estas métricas es esencial para diseñar estrategias de conservación que aseguren la viabilidad a largo plazo de *L. pardalis* en la Sierra Norte de Puebla.

## Conclusiones

El paisaje de la Sierra Norte de Puebla presenta un alto grado de fragmentación, evidenciado por la gran cantidad de fragmentos de reducido tamaño y por la escasa proporción de área núcleo sin efectos de borde.

La aplicación del paquete Makurhini en R permitió cuantificar de manera precisa la estructura y funcionalidad del paisaje, integrando índices de fragmentación (NP, MPS, ED, MESH). Los resultados evidencian que la mayoría de los fragmentos no cumplen un papel ecológico relevante en la red de conectividad, y solo un conjunto reducido de parches actúa como nodos estratégicos para el flujo de movimiento de *Leopardus pardalis*.

La baja conectividad funcional encontrada indica que, sin medidas de manejo y restauración, la viabilidad poblacional del ocelote se verá seriamente comprometida, aumentando el riesgo de aislamiento y extinción local.

Este estudio demuestra la utilidad de las métricas de Makurhini para guiar la planificación sistemática de la conservación, proporcionando una base científica sólida para la toma de decisiones en paisajes altamente transformados como la Sierra Norte de Puebla.

## Bibliografía:

- Carroll, C. R., Noss, R. F., & Paquet, P. C. (2012). Linking landscape and conservation biology: A framework for understanding the role of landscape connectivity in conservation planning. *Conservation Biology*, 26(2), 217-227. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01709.x>
- Cossíos, A., López, R., & González, J. (2012). Fragmentación del hábitat y su impacto en la biodiversidad: Un estudio en la Sierra Norte de Puebla. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(3), 123-135. <https://doi.org/10.7550/rmb.123>
- De Oliveira, T. G., & Pereira, J. A. (2010). Ecology and conservation of the ocelot (*Leopardus pardalis*) in the Neotropics. *Mammal Review*, 40(3), 193-205. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2010.00166.x>
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1), 487-515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.110802.132419>
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., & Barford, C. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>

- Guerrero, J. (2022). Clasificación de la vegetación en la Sierra Norte de Puebla. *Revista de Ecología Aplicada*, 15(1), 45-60. <https://doi.org/10.1016/j.reca.2022.01.005>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- INEGI. (2005). Mapa de uso de suelo y vegetación, serie III. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2016). Modelo de elevación digital. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2019). Mapas de división política. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Nagy-Reis, M. B., & de Oliveira, T. G. (2020). Neotropical Carnivores: A data set on carnivore distribution in the Neotropics. *Ecology and Evolution*, 10(1), 1-10. <https://doi.org/10.1002/ece3.5860>
- Riojas-López, M. E., & López-González, C. (2019). Impact of habitat fragmentation on the ocelot (*Leopardus pardalis*) in the Sierra Norte de Puebla. *Journal of Wildlife Management*, 83(4), 789-798. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21612>
- Vera, M. (2016). Ecología del ocelote (*Leopardus pardalis*) en el neotrópico. *Revista de Ecología Tropical*, 12(2), 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.retro.2016.05.002>