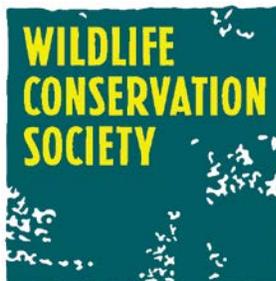


*Conectividad entre Hábitats del Jaguar e
Identificación de Lugares Potenciales para la Mitigación de Impactos Carreteros
en la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar*

*Informe Final para U.S. Fish and Wildlife Service
como cumplimiento parcial del Contrato F14PX00340*



© Emma y Brendon Cary - www.totallytandem.com
Parque Nacional Tikal, Reserva de la Biósfera Maya, Guatemala



**Kelly J. Stoner, Amanda R. Hardy, Kim Fisher y
Eric W. Sanderson**

16 de marzo de 2015

Cita Sugerida: Stoner, K. J., A. R. Hardy, K. Fisher, y E. W. Sanderson. 2015. Conectividad entre Hábitats del Jaguar e Identificación de Lugares Potenciales de Mitigación de Impactos Carreteros en la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar. Informe final de Wildlife Conservation Society para U.S. Fish and Wildlife Service en respuesta a la solicitud F14PX00340, enviado el 16 de marzo de 2015. 29 pp.

CONTENIDO

Índice de Cuadros	iii
Índice de Figuras	iv
Resumen	1
Introducción	2
Métodos	4
Área de Estudio.....	4
Descripción del Proceso de Modelado	5
Modelo de Aptitud del Hábitat y Selección de Parches.....	5
Modelado de la Conectividad del Hábitat	6
Resultados	7
Aptitud del Hábitat y Parches de Hábitat	7
Conectividad a través de la Unidad de Recuperación del Noroeste.....	7
Corredores, Carreteras de Interés y Sitios Potenciales para las Infraestructuras de Cruce.	8
Discusión	9
Bibliografía	12
Glosario	15

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1. Superficie de hábitat apto y núcleo y número de parches de hábitat por Área en la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar. Calculamos la cantidad de hábitat apto usando el método descrito por Sanderson y Fisher (2013). Creamos parches de hábitat en el Área Secundaria Fronteriza usando todos los hábitats disponibles (parches de hábitat apto). Derivamos los parches de hábitat en las otras tres Áreas seleccionando solo los hábitats de alta calidad en parches contiguos mayores a 100 km² y con poca influencia relativa antrópica (parches de hábitat núcleo). 18
- Cuadro 2. Carreteras de interés evaluadas en nuestro estudio y número de veces que cada una intersecta un corredor predictivo para la conectividad en la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar. Seleccionamos las carreteras de acuerdo a la opinión de expertos en jaguares y el U.S. Fish and Wildlife Service. I=Interestatal (EEUU); SR=Ruta Estatal (EEUU); Fed.=Carretera Federal (México). 19

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Mapa de la Unidad de Recuperación Noreste del Jaguar (NRU), actualizado por Sanderson y Fisher (2013). La NRU abarca 226.826 km² desde el sudoeste de Nuevo México y sudeste de Arizona en Estados Unidos, hacia el sur entrando a México por la cadena montañosa Sierra Madre Occidental hasta Colima. En la NRU hay dos “Áreas Núcleo” con registros continuos y verificados de jaguares y evidencia reciente de reproducción, y dos “Áreas Secundarias”, con registros históricos y/o recientes de jaguares pero con pocos o ningún registro de reproducción..... 20
- Figura 2. Puntuación de la aptitud del hábitat en la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar. Se combinaron cinco variables ambientales – cobertura boscosa, superficie del suelo, distancia al agua, influencia antropogénica y ecorregión – para estimar el puntaje de la aptitud del hábitat. Ver Figure 1 para mayor información sobre las Áreas Núcleo y Secundarias (Sanderson y Fisher 2013)...... 21
- Figura 3. Los 8 parches de hábitat núcleo usados para estimar la conectividad de hábitat para los jaguares en la Unidad de Recuperación Noroeste. Los parches en México se derivaron del modelo de aptitud del hábitat seleccionando sólo los hábitats de alta calidad en parches contiguos mayores a 100 km² y con baja influencia antrópica. 22
- Figura 4. Los 34 parches de hábitat apto en el Área Secundaria Fronteriza usados para predecir la conectividad del hábitat para jaguares en la Unidad de Recuperación Noreste. Los parches en el Área Secundaria Fronteriza estaban compuestos por todo el hábitat apto del Área, como fue modelado en Sanderson y Fisher 2013..... 23
- Figura 5. Predicción de la conectividad de los hábitats para el jaguar y carreteras de interés en la Unidad de Recuperación Noroeste (NRU). Creamos este modelo usando el programa Circuitscape, el cual predice la conectividad aplicando la teoría de circuitos eléctricos a una serie de nodos (parches de hábitat fuente) y una superficie de conducción (el modelo de aptitud de hábitat en la Figura 2). Los corredores, donde las probabilidades de conectividad son altas, indican áreas donde hay menos rutas disponibles para el desplazamiento de los jaguares. Estimamos las intersecciones entre la conectividad y las carreteras de interés en los EEUU y en México, etiquetadas en color gris en el mapa: Interestatal-19, Ruta Estatal 82, y Ruta Estatal 83 en EEUU, Carreteras Federales 2, 15, 16, 40 y 150 en México..... 24
- Figura 6. Conectividad del hábitat para jaguares y carreteras de interés en el Área Secundaria Fronteriza (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). Un examen visual de este modelo de conectividad que se extiende a través de toda la Unidad De Recuperación del Noroeste revela tres corredores que se extienden a lo largo de la frontera entre México y EEUU. Estos corredores se cruzan con las Carreteras Federales 2 y 15 en México. Las Rutas Estatales 82 y 83 en EEUU también se cruzan con parches de hábitat fuente, lo que podría impactar la conectividad para los jaguares. Estas áreas son ideales para realizar evaluaciones con el fin de determinar su potencial para instalar estructuras de cruce..... 25

- Figura 7. Conectividad del hábitat para jaguares y carreteras de interés en el Área Secundaria Fronteriza (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). La conectividad es difusa en la parte central del Área Núcleo Sonora, pero se estrecha hacia un corredor más obvio en la parte sur del Área. Aunque la carretera federal 16 de México, representada aquí, no se cruza con ningún corredor, aún tiene el potencial de actuar como barrera para la dispersión de los jaguares. Se necesitan estudios de campo para identificar las ubicaciones precisas para futuros esfuerzos de mitigación vial..... 26
- Figura 8. Conectividad del hábitat y carreteras de interés en el Área Secundaria Sinaloa de la Unidad de Recuperación Noroeste del jaguar (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). Las probabilidades de conectividad son difusas en esta Área Núcleo, pero aparece un corredor claro de norte a sur en la parte central de esta Área. No hay carreteras de interés cruzando esta área..... 27
- Figura 9. Conectividad del hábitat y carreteras de interés en la porción norte del Área Núcleo Jalisco de la Unidad de Recuperación Noroeste del jaguar (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). La conectividad está concentrada cerca del centro del Área Núcleo, corriendo principalmente de norte a sur. La Carretera Federal 40 cruza un corredor, indicado con un círculo. El área resaltada es apta para estudios mayores y como sitio para potenciales estructuras de cruce de fauna. 28
- Figura 10. Conectividad del hábitat y carreteras de interés en la porción sur del Área Núcleo Jalisco de la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). La conectividad está concentrada en varios corredores de norte a sur en esta parte del Área Núcleo. En particular, la Carretera Federal 150 de México cruza 3 corredores, marcados con círculos rosados, que son ideales para futuros estudios y para potenciales estructuras de cruce de fauna..... 29
- Figura 11. Carreteras de interés en la Unidad de Recuperación Noroeste. Todas las carreteras pueden afectar el desplazamiento de los jaguares en diferentes grados; sin embargo, las carreteras de alto tránsito de 2 y 4 carriles (Carreteras 2, 16, 40 y 150 en México) podrían tener el mayor potencial de interferir con los movimientos de los jaguares y por eso se separaron para un mayor análisis. Adicionalmente, otras carreteras que intersectan hábitat fuente y que tienen el potencial de convertirse en carreteras de alto tránsito en el futuro (Carreteras 19, 82 y 83 en EEUU) fueron separadas para un análisis futuro. 30

RESUMEN

La pérdida y fragmentación del hábitat debido a las actividades antrópicas son una gran amenaza para la supervivencia del jaguar (*Panthera onca*) a lo largo de su distribución. Si bien se han realizado estudios de disponibilidad de hábitat y conectividad a gran escala, hacen falta estudios regionales que reflejen las preferencias de hábitat y de ambientes locales de esta especie altamente adaptable. Es de particular interés llevar a cabo un estudio sobre la conectividad regional en el límite norte de la distribución del jaguar debido a los esfuerzos del U.S. Fish and Wildlife Service para recuperar la especie a lo largo de su distribución, sobre todo enfocado en la Unidad de Recuperación Noroeste (NRU) para el jaguar.

En este informe tratamos de identificar lugares donde los esfuerzos de mitigación, tales como estructuras de cruce en caminos, se pueden usar para prevenir la fragmentación y promueven la conectividad del hábitat en la NRU, un área identificada en el Esquema para la Recuperación del Jaguar (U.S. Fish and Wildlife Service 2012, actualizado en Sanderson y Fisher 2013). Utilizamos la teoría de circuitos eléctricos para predecir los corredores importantes para los jaguares y las ubicaciones donde los movimientos de los jaguares pueden ser obstruidos por las infraestructuras de transporte. Nuestro análisis reveló siete sitios donde los cruces de caminos mejorarían la conectividad del hábitat para los jaguares en la NRU. Basados en estos resultados, presentamos sugerencias y consideraciones para los próximos pasos sobre la planificación para incorporar medidas que mantengan la conectividad y el desplazamiento del jaguar a través de estos paisajes.

INTRODUCCIÓN

Las poblaciones de carnívoros grandes como el jaguar (*Panthera onca*) se están reduciendo a nivel global debido a la pérdida, degradación y fragmentación de su hábitat, la cacería de la especie y sus presas, y la persecución debido a ataques al ganado (Sanderson et al. 2002b, Hilty et al. 2006, Rabinowitz y Zeller 2010, Estes et al. 2011, U.S. Fish and Wildlife Service 2012, Ripple et al. 2014). El uso del suelo y modificación antrópica han reducido el hábitat disponible para los jaguares y, junto con el cambio climático, amenazan con incrementarse en el futuro (ej. U.S. Fish and Wildlife Service 2012). La pérdida directa del hábitat está exacerbada por la fragmentación, que amenaza a largo plazo la salud y supervivencia de esta especie de amplio rango y baja densidad natural impidiendo el flujo genético entre poblaciones (Crooks et al. 2011). Las subpoblaciones aisladas resultantes son vulnerables a la extinción local. Resulta crítico para la conservación de los carnívoros mantener la conectividad y la preservación de su influencia en la biodiversidad y los procesos ecosistémicos (Colchero et al. 2011, Rodríguez-Soto et al. 2013, Ripple et al. 2014).

Los jaguares son un excelente estudio de caso para evaluar la conectividad de la población y la fragmentación potencial. Aunque los jaguares actualmente existen en el 61% de su distribución histórica (Zeller 2007), estudios genéticos recientes indican que el flujo genético aún es alto (Eizirik et al. 2001). Una serie de análisis recientes de amplio rango han priorizado los hábitats para el jaguar (ej. Sanderson et al. 2002a) y han identificado los [corredores](#) potenciales entre estas áreas (ej. Rabinowitz y Zeller 2010) a lo largo de la distribución del jaguar. Sin embargo, hay una necesidad evidente de un análisis regional de la conectividad que refleje mejor las preferencias locales de hábitat de esta adaptable especie (Petracca et al. 2013).

Debido a la escasa existencia de estudios regionales sobre conectividad del hábitat en el extremo norte de la distribución del jaguar, los estudios en otras áreas dan luces sobre el efecto de la fragmentación del hábitat y el desarrollo vial sobre las poblaciones de jaguares. Un estudio en el bosque atlántico en Brasil encontró que la fragmentación del hábitat (que ocurrió en la segunda mitad del Siglo XX) redujo de manera mensurable la diversidad genética de los jaguares (Haag et al. 2010). Un análisis de corredores de menor costo en la Caatinga, también en Brasil, encontró que las poblaciones remanentes de jaguares no estaban conectadas, probablemente debido a un incremento en el uso del suelo por parte de la gente y una disponibilidad limitada del agua, a pesar del hecho de que aparentemente el hábitat xérico era abundante (Morato et al. 2014). Un modelo de desplazamiento basado fragmentación del hábitat debido a los caminos para la Selva Maya de la península de Yucatán encontró que los jaguares hembras son sensibles a la presencia de caminos y cruzan los caminos con mucha menos frecuencia que los machos (Colchero et al. 2011). En conjunto, estos estudios sugieren que la fragmentación del hábitat y el aislamiento de las subpoblaciones se puede dar en la Unidad de Recuperación del Noroeste (NRU; U.S. Fish and Wildlife Service 2012, actualizado en Sanderson y Fisher 2013).

Es preciso realizar un análisis de conectividad regional para conservar efectivamente los jaguares en la NRU. Este análisis es de particular interés para el U.S. Fish and Wildlife Service (USFWS) y el Equipo de Recuperación del Jaguar para apoyar los esfuerzos de recuperación del jaguar a lo largo de su distribución, con énfasis en la NRU. La conectividad a lo largo de todas las áreas de la NRU es un componente clave en la recuperación de la especie, pero la naturaleza de esta

conectividad no se conoce y necesita de mayor investigación (U.S. Fish and Wildlife Service 2012).

El Esquema de Recuperación del Jaguar identifica las acciones preliminares para la recuperación, incluyendo el análisis del hábitat y uso de corredores para mantener y mejorar la conectividad del hábitat del jaguar en el límite norte de la distribución de la especie entre poblaciones para incrementar la supervivencia a largo plazo de las subpoblaciones (U.S. Fish and Wildlife Service 2012). En conjunto, el esquema también recomienda estudiar los impactos de las autopistas y el tráfico vehicular sobre el desplazamiento de los jaguares, así como la efectividad de los métodos para mitigar las limitaciones que las infraestructuras de transporte le imponen a los movimientos de los jaguares. Específicamente, las acciones de recuperación identifican dónde y cómo se pueden incorporar pasos subterráneos o elevados y otros diseños a las infraestructuras de transporte para facilitar el movimiento de los jaguares donde sea necesario.

Para evaluar dónde son necesarias estas medidas de mitigación, el modelado de las medidas de mitigación puede aplicarse para predecir dónde los jaguares se pueden estar desplazando y dónde las infraestructuras de transporte pueden impedir estos movimientos. La teoría de circuitos eléctricos proporciona un método riguroso para predecir la conectividad entre parches de hábitat (McRae et al. 2008). El uso de la teoría de circuitos en la conectividad ecológica usa algoritmos que son suficientemente simples y eficientes como para ser calculados con bases de datos extensas y permitiendo análisis a una escala amplia en el espacio y/o tiempo.

En este método, los parches de hábitat son tratados como [nodos](#) de un circuito eléctrico, conectados por los bordes. Los bordes están caracterizados por cargas que representan la probabilidad de que un electrón (o un jaguar) pueda moverse a través de ellos; estas cargas pueden interpretarse como el valor de conductividad o resistencia, que es una amalgama de variables que asumen la influencia de la ocupación animal y el movimiento dentro y alrededor del sitio (Shah y McRae 2008). Cuando un animal se mueve de un nodo a otro, las características del paisaje cambian y también lo hace el valor subyacente de cada pixel. La teoría de circuitos puede usarse para predecir la probabilidad de que los animales silvestres, como el jaguar, pueden moverse selectivamente por rutas específicas dados valores de conductividad / resistencia (Shah y McRae 2008).

La teoría de circuitos reconoce múltiples rutas en el paisaje, y los resultados se adaptan a medida que rutas adicionales son añadidas o eliminadas (McRae et al. 2008), haciendo que este método sea de particular valor para identificar los corredores más importantes que influyen en la conectividad (Shah y McRae 2008). Los pixeles con pocas probabilidades de conductividad están ubicados en amplios sectores de hábitat potencial que pueden ser usados por lo general por la especie de interés, mientras que los pixeles con altas probabilidades de conductividad reflejan vías específicas que pueden ser corredores importantes donde la conectividad puede ser particularmente vulnerable.

A gran escala, se pueden evaluar visualmente estos resultados para identificar dónde los corredores podrían encontrarse con carreteras que pueden potencialmente impedir el movimiento de la fauna. Los encargados de gestión de fauna y las agencias de transporte pueden usar esta

información para realizar evaluaciones puntuales en el campo acerca de estos sectores problemáticos para considerar la construcción de estructuras tales como vallas que guíen la fauna hacia pasos elevados o subterráneos donde los animales pueden cruzar las carreteras con seguridad.

El objetivo de este reporte es identificar las áreas potenciales donde algunas estructuras (como pasos subterráneos, elevados, vallas, etc.) mejorarían el paso de los jaguares a través de diferentes tipos de corredores viales que serían efectivos en diferentes tipos de hábitat de la NRU en México y el sudoeste de Estados Unidos. Utilizamos la teoría de circuitos y el modelado de conectividad para predecir corredores importantes para jaguares y zonas donde los movimientos de los jaguares pueden impedirse por las infraestructuras de transporte. Basados en estos resultados, presentamos sugerencias y consideraciones para los próximos pasos en la planificación e incorporación de medidas para mantener la conectividad y el desplazamiento seguro de los jaguares a través de estos paisajes. Este reporte está complementado por otro (Matthews et al., 2015) que resume las recomendaciones para el diseño de estructuras de cruce de fauna. En conjunto, estos reportes se presentan para llenar los vacíos y los requerimientos de investigación identificados en el Esquema para la Recuperación del Jaguar (U.S. Fish and Wildlife Service 2012).

MÉTODOS

Área de Estudio

Usando el modelo de hábitat para el jaguar desarrollado por Sanderson y Fisher (2013), modelamos los parches de hábitat y su conectividad a lo largo de la NRU ([Figura 1](#)), que abarca aproximadamente 226.826 km², de los cuales 196.805 km² corresponden a México y 29.021 km² a EEUU. La NRU se extiende desde el borde norte de Colima, México hacia el norte a través de la cordillera Sierra Madre Occidental y áreas desérticas del norte de México (Polisar et al. 2014), y hacia áreas al sur de la Interestatal 10 entre las Montañas Animas y Baboquivari en el límite sur de Arizona y Nuevo México en los EEUU. En la NRU hay dos “[Áreas Núcleo](#)”: Sonora y Jalisco, que tienen registros verificados y constantes de jaguares y evidencia reciente de reproducción; y dos “[Áreas secundarias](#)”: Sinaloa y Fronteriza, con registros históricos y/o recientes de jaguares pero con pocos o ningún registro reciente de reproducción ([Figura 1](#); U.S. Fish and Wildlife Service 2012, Sanderson y Fisher 2013). La altura en la NRU oscila entre el nivel del mar a lo largo de la costa hasta los 3.300 msnm. El hábitat en el área de estudio va desde bosque seco tropical deciduo y bosques de pino y roble en el Área Núcleo de Jalisco y Área Secundaria Sinaloa en el límite sur de la NRU, pasando por bosque seco tropical semi-deciduo y matorral espinoso en el Área Núcleo Sonora, hasta una mezcla de matorrales y pastizales, bosques de pino y roble, y bosques montanos de coníferas en el Área Secundaria Fronteriza (U.S. Fish and Wildlife Service 2012) en el extremo norte de la NRU.

El uso del suelo y la tenencia de tierra varían a lo largo de la NRU. En el Área Secundaria Fronteriza en los EEUU, la mayor parte de la tierra es fiscal y está manejada por entidades tribales (la Nación Tohono O’odham) y agencias estatales y federales, incluyendo el Servicio Forestal de EEUU, la Secretaría de Uso de Tierra de EEUU, el Servicio Nacional de Parques de EEUU, el Servicio de Caza y Pesca de EEUU (USFWS) y el Departamento de Tierras del Estado

de Arizona (U.S. Fish and Wildlife Service 2012). Gran parte de estas tierras tienen cierto grado de protección del hábitat y la fauna, aunque algunas tierras son de uso mixto, tales como del Servicio Forestal de EEUU, la Secretaría de Uso de Tierra y tierras fiscales. Por lo general las partes montañosas están bajo algún tipo de protección, mientras que la base de los valles suelen ser usados para infraestructuras de transporte y otros tipos de construcciones. También hay actividades mineras en varios sitios de la porción estadounidense del Área Secundaria Fronteriza. En México, el uso de la tierra es principalmente una combinación de tierras privadas, comunales e indígenas. Además, existen muchas áreas protegidas (a nivel federal, estatal y municipal) en la NRU (U.S. Fish and Wildlife Service 2015, en prep.). De forma similar, la tierra es usada para diversos propósitos: la ganadería es la principal actividad económica en el Área Núcleo Sonora, mientras que en el Área Secundaria Sinaloa las llanuras costeras (que representan el 35% de esta área) están siendo transformadas en zonas agrícolas, de acuicultura y asentamientos humanos (Polisar et al. 2014). En el Área Núcleo Jalisco, la ganadería y la agricultura son comunes, así como el desarrollo turístico a lo largo de la costa (Polisar et al. 2014).

En 2014, el USFWS delineó el [hábitat crítico](#) para el jaguar en Arizona y Nuevo México (U.S. Fish and Wildlife Service 2014). El hábitat crítico no establece un área de conservación, sin embargo, recibe algo de protección bajo la Ley de Especies Amenazadas. En total, el hábitat crítico está formado por seis unidades que comprenden 3.093 km² (U.S. Fish and Wildlife Service 2014), de las cuales aproximadamente el 67% son tierras federales, el 16% son tierras estatales y el 17% son tierras privadas. El hábitat crítico no incluye tierras tribales.

Descripción del Proceso de Modelado

Para identificar los sitios potenciales donde se podría mejorar el paso de los jaguares a través de los corredores, examinamos primeramente la conectividad del hábitat en la NRU. Nuestro procedimiento utilizó el modelo de aptitud del hábitat creado por Sanderson y Fisher (2013) así como la [superficie de conducción](#) (que representa la facilidad con la que un jaguar se mueve a través de cada pixel) y los parches de hábitat derivados del modelo de disponibilidad de hábitat para predecir los movimientos de los jaguares (ej. el [modelo de conectividad](#)). Identificamos y describimos los corredores que tuvieran las mayores probabilidades de tener jaguares. Luego de crear el modelo de conectividad, identificamos las intersecciones entre las carreteras de interés y los [hábitats conectivos](#) importantes. Estos pasos son detallados a continuación.

Modelo de Aptitud del Hábitat y Selección de Parches

Desde 2011 hasta 2013 el subgrupo técnico del Equipo de Recuperación del jaguar con el apoyo de Wildlife Conservation Society preparó una serie de mapas de disponibilidad de hábitat para los jaguares en la NRU (Sanderson y Fisher 2011, 2013). El subgrupo seleccionó cinco variables ambientales (cobertura boscosa, superficie del terreno, distancia al agua, influencia antrópica y tipo de hábitat) para incorporarlas en la evaluación de la aptitud del hábitat. El subgrupo examinó la importancia relativa de cada variable basándose en histogramas de las observaciones de jaguares para asignar una importancia relativa a cada variable (ver Sanderson y Fisher 2011, 2013 para más detalles). Las variables resultantes con su importancia relativa fueron combinadas para producir una puntuación de la aptitud del hábitat para cada pixel de 1 km² en la NRU, que va desde 0,1 (baja aptitud) hasta 8,2 (alta aptitud; [Figura 2](#)).

Para comenzar con el proyecto actual, derivamos los [parches de hábitat núcleo](#) de la versión 13 del modelo de aptitud del hábitat (Sanderson y Fisher 2013). Los parches de hábitat núcleo fueron definidos como [hábitat de alta calidad](#) en bloques contiguos de más de 100 km² con poca influencia antrópica. Quitamos los parches menores a 100 km², y luego quitamos todos los píxeles con un puntaje alto para la influencia humana (como lo definió el subgrupo técnico; ver Anderson y Fisher 2013). Este método resultó en ocho parches de hábitat núcleo en tres Áreas del sur de la NRU (Sonora, Sinaloa, y Jalisco; [Figura 3](#)). Sin embargo, con este método no se encontraron hábitats núcleo en la porción estadounidense del Área Secundaria Fronteriza y solo un parche pequeño en la porción mexicana de esta misma Área, que cumplió con nuestros requerimientos de calidad, tamaño y grado de influencia humana. Así, creamos parches en el Área Secundaria Fronteriza usando todos los píxeles de [hábitat apto](#) (Sanderson y Fisher 2013; [Figura 4](#)), que resultaron en 34 [parches de hábitat apto](#) para esta Área. Luego unimos estos 34 parches de hábitat apto con los 8 parches de hábitat núcleo identificados en la otras tres Áreas para producir una serie de 42 [parches totales de hábitat](#) en la NRU.

Dado que los parches totales de hábitat producidos por nuestro modelo incluían un gran porcentaje del área total de la NRU ([Cuadro 1](#)), seleccionamos el porcentaje mínimo de píxeles posible para crear nodos para el análisis. *Circuitscape* (ver más abajo) no estima la conectividad dentro de los mismos parches de hábitat, así que utilizando todos los parches identificados no producirá una evaluación óptima de la conectividad en el área de estudio. Entonces elegimos el 3% de los píxeles totales de hábitat más cercanos a los límites norte y sur para representar los nodos núcleo, o los [hábitats fuente](#), para propósitos de modelado el cual sumó 10.250 km² ([Figura 5](#)). Usando estas áreas como fuente de hábitat nos permitió modelar la conectividad a través de la NRU sin perder especificidad en los corredores en el extremo norte y sur del área de estudio.

Modelado de la Conectividad del Hábitat

Utilizamos el programa *Circuitscape* (v4.0; Shah y McRae 2008) para predecir la conectividad a lo largo de toda la NRU, incluyendo las cuatro Áreas, desde su límite norte en Arizona y Nuevo México hasta su límite sur en Colima. *Circuitscape* precisó de dos entradas: una serie de nodos para ser conectados y una [superficie de conducción](#). Utilizamos el modelo de aptitud del hábitat descrito anteriormente como nuestra superficie de conducción, que representa la facilidad con la que los jaguares pueden moverse en el paisaje. Para el análisis en toda la NRU, usamos el 3% de los parches totales de hábitat más cerca de los límites norte y sur de la NRU ([Figura 5](#)). Usamos el método de modelado en pares, en el que se identificaron las rutas entre cada posible par de nodos (ej. un par es un nodo en el norte y otro en el sur). Se le asignó un posible valor a estas rutas que representa la posibilidad de que un jaguar transitaría por un pixel contra otro pixel vecino disponible. Los resultados presentados a continuación representan las probabilidad de desplazamiento de jaguares acumuladas a través de todas las comparaciones pareadas (ej. la [superficie de conectividad](#)).

Un examen visual de la [superficie de conectividad](#) permitió la identificación de [corredores](#). Examinamos el solapamiento entre corredores y carreteras de interés en la NRU. Seleccionamos las carreteras de acuerdo al criterio de los expertos de campo (C. López-González, Universidad

de Querétaro, com. pers.) y el U.S. Fish and Wildlife Service. En general, las carreteras seleccionadas son de cuatro carriles y con alto tránsito, aunque dos carreteras tienen dos carriles y se seleccionaron debido a su ubicación en relación al hábitat del jaguar y la posibilidad de que en el futuro sean de alto tránsito. Esta evaluación de grano grueso nos permitió identificar lugares donde las carreteras se crucen con corredores y donde investigaciones adicionales pueden ayudar a verificar y seleccionar las ubicaciones óptimas para las acciones de mitigación viales.

RESULTADOS

Aptitud del Hábitat y Parches de Hábitat

El [conjunto total de parches de hábitat](#) derivado de nuestros métodos sumó un área de 170.854 km², con el total para las áreas Núcleo y Secundaria resumido en el [Cuadro 1](#).

El hábitat núcleo está representado en ocho (8) parches en toda la NRU. A excepción de un parche muy pequeño de hábitat núcleo en el Área Secundaria Fronteriza, estos parches se encuentran en las Áreas Núcleo Sonora y Jalisco y en el Área Secundaria Sinaloa. Un parche muy grande continuo se extiende desde el extremo norte del Área Núcleo Sonora, a través del Área Secundaria Sinaloa, hasta abarcar casi todo el Área Núcleo Jalisco ([Figura 3](#)). En términos del método de modelado utilizado aquí, la existencia de este parche núcleo sugiere que las dos Áreas Núcleo están bien conectadas por un [hábitat de alta calidad](#).

El [hábitat apto](#) en el Área Secundaria Fronteriza está representado en 34 parches ([Figura 4](#)). Gran parte del área en el Área Fronteriza es apta para mantener jaguares, además de que un gran parche continuo abarca gran parte de la porción mexicana del Área Fronteriza y se extiende hacia el norte hasta la porción de EEUU también. Varios parches pequeños en los EEUU están representados principalmente por cadenas montañosas, incluyendo las Montañas Parilla, Baboquivari, Sierrita, Tucson, Mule y Dragoon en Arizona y las Montañas Animas en Nuevo México.

Conectividad a través de la Unidad de Recuperación del Noroeste

Los resultados del análisis con *Circuitscape* indicaron que la conectividad varió entre el sudoeste de EEUU y Colima, mostrando varios corredores importantes en la NRU ([Figura 5](#)). Gran parte de la porción mexicana del Área Fronteriza tiene valores de probabilidad bajos ([Figura 6](#)). Una baja [probabilidad de conectividad](#) no significa que la ruta es menos apta para jaguares; más bien, los valores bajos indican que hay muchas rutas disponibles para el desplazamiento de los felinos y no se puede predecir cuál de ellas utilizarán. Sin embargo, hay dos corredores distintos que se extienden desde la parte norte del Área Núcleo Sonora a través de la parte mexicana del Área Secundaria Fronteriza, que se divide en tres corredores cerca de la frontera entre México y EEUU ([Figura 6](#)). Específicamente, en el Área Secundaria Fronteriza, el corredor oeste se divide cerca de la Autopista Federal Mexicana 15 (Fed. 15) en el norte de México y cruza la frontera en las Montañas Pajarito, Patagonia y Huachuca en el sur de Arizona ([Figura 6](#)). El corredor este es bastante estrecho y cruza la frontera México – EEUU en las Montañas Peloncillo en Arizona y Nuevo México ([Figura 6](#)).

La conectividad es bastante difusa en la parte central del Área Núcleo Sonora, pero se reduce a un corredor más evidente en la parte sur del Área (Figura 7). La conectividad también se ve dispersa en el paisaje del Área Secundaria Sinaloa, sin embargo aparece evidente un corredor que va de norte a sur en la parte central del Área (Figura 8). En el Área Núcleo Jalisco la conectividad se concentra cerca del centro de la porción norte del Área, con corredores que van principalmente de norte a sur (Figura 9). En la porción sur del Área Núcleo Jalisco la conectividad se concentra a lo largo de varios corredores norte-sur (Figura 10).

Corredores, Carreteras de Interés y Sitios Potenciales para las Infraestructuras de Cruce

Evaluamos una carretera federal y dos estatales en EEUU y cinco carreteras federales en México dentro de la NRU para identificar áreas donde el desplazamiento de los jaguares pudiera estar limitado (Figura 11). En los EEUU, estas carreteras incluyeron la Interestatal 19 (I-19), la cual corta la porción estadounidense del Área Secundaria Fronteriza (Figura 5), y las Rutas Estatales 82 (SR 82) y 83 (SR 83), que combinadas cortan la porción norteamericana del Área Secundaria Fronteriza (Figura 5). En México, estas carreteras incluyeron la Carretera Federal 2 (Fed. 2) a lo largo de la frontera México – EEUU y su unión con la Carretera Federal 15 (Fed. 15), la cual corta la porción mexicana del Área Secundaria Fronteriza (Figura 5); la Carretera Federal 16 (Fed. 16) que atraviesa el Área Núcleo Sonora (Figura 5); y las Carreteras Federales 40 (Fed. 40) y 150 (Fed. 150) que cruzan el Área Núcleo Jalisco (Figura 5).

Nos enfocamos en las intersecciones entre estas carreteras y los corredores en el modelo para la conectividad del jaguar para identificar, a gran escala, zonas donde se pueden modificar las infraestructuras de transporte a fin de reducir el impacto carretero sobre la conectividad del jaguar en la NRU. Se encontraron un total de 10 zonas donde las carreteras se cruzan con corredores (Figuras 6 hasta 10).

De acuerdo a nuestros resultados, la Interestatal 19, en EEUU, no se interseca con ningún punto de la predicción de conectividad (Figura 6). Sin embargo, hay registros de presencia de jaguares tanto hacia el este como el oeste de la I-19, y por ende, esta carretera podría representar una amenaza para el desplazamiento de los jaguares en la parte de EEUU del Área Secundaria Fronteriza. Por el contrario, SR 82 y SR 83 se cruzan significativamente con el hábitat fuente y el hábitat conectivo hacia el sudeste de Tucson, Arizona (Figura 6). La SR 82 en particular, se cruza con dos corredores (Figura 6).

En México, las carreteras Fed. 2 y Fed. 15 en el Área Secundaria Fronteriza cortan tres corredores identificados (Figura 6). La Fed. 2 se extiende a todo lo ancho del Área Secundaria Fronteriza y se interseca con cada uno de los dos corredores identificados (Figura 6). La Fed. 15, que se bifurca desde la Fed. 2 y corre al norte hacia la frontera entre México y Estados Unidos, corta un corredor que nuestros resultados indican que es crítico para mantener la conectividad de la porción mexicana en la parte oeste del Área Secundaria Fronteriza (Figura 6). La Fed. 16, que atraviesa el Área Núcleo Sonora, no se cruza con corredor alguno (Figura 7), sin embargo, esto no indica que la Fed. 16 no tiene un impacto potencial sobre la conectividad. Más aún, el modelo indica que es probable que los jaguares que se dispersan crucen esta carretera en varios puntos, por lo que es difícil determinar la ubicación ideal para una estructura de cruce. Se precisa mayores estudios para identificar los lugares donde se podrían construir tales cruces. No

se identificó carretera alguna en el Área Secundaria Sinaloa ([Figura 8](#)), pero la Fed. 40 cruza un corredor en la parte central del Área Núcleo Jalisco ([Figura 9](#)), y la Fed. 150 cruza 3 corredores cerca del extremo sur del Área Núcleo donde el hábitat ya está fragmentado debido a la actividad antrópica ([Figura 10](#)).

DISCUSIÓN

El modelo de aptitud del hábitat ([Figura 2](#)) concuerda con las evaluaciones de disponibilidad de hábitat a amplio rango (ej. Sanderson et al. 2002). Este estudio es el primero en modelar el hábitat del jaguar a nivel regional en la NRU. Otros estudios de conectividad en el extremo norte de la distribución del jaguar han usado rutas de menor costo (Rodríguez-Soto et al. 2013), datos de ocupación obtenidos en entrevistas a gente local (Petraça et al. 2013), o la opinión de expertos (Grigione et al. 2009) para modelar la conectividad. Por el contrario, nuestros métodos aplicaron la teoría de circuitos eléctricos a un modelo de aptitud del hábitat para predecir las rutas probables de desplazamiento de los jaguares a través del paisaje. Debido a que nuestra técnica tiene varias ventajas comparadas con los métodos usados previamente - tomando en cuenta el comportamiento aleatorio de algunos individuos (McRae et al. 2008) y no está sesgado por la respuesta del entrevistado - nuestro [modelo de conectividad](#) es también el más riguroso producido hasta ahora. Basados en estos resultados, presentamos una evaluación de grano grueso sobre los lugares donde ocho carreteras de interés (tres en EEUU y cinco en México) se cruzan con corredores y donde estructuras como pasos elevados o subterráneos con vallas pueden facilitar la dispersión de los jaguares a pesar de la presencia de la carretera.

Nuestros resultados sugieren 10 sitios candidatos donde las medidas de mitigación carreteras ayudarían a mantener la conectividad de los jaguares en la NRU: seis en el Área Secundaria Fronteriza (tres en EEUU y tres en México; [Figura 6](#)) y cuatro en el Área Núcleo Jalisco ([Figura 9 y 10](#)). En estos 10 sitios se necesitan estudios de campo para evaluar la posibilidad de construir pasos elevados o subterráneos y vallas para ayudar a la dispersión de los jaguares (Matthews et al. 2015). Estos estudios, complementados con estudios de campo sobre los movimientos de los jaguares en cada región (ej. usando telemetría GPS o trampas cámara para validar los resultados del modelo de conectividad), ayudarán a identificar los lugares específicos donde los pasos serían más utilizados por los jaguares (ver Polisar et al. 2014 sobre una revisión de las técnicas de monitoreo).

De forma similar, se precisa de evaluaciones para identificar lugares para construir cruces de fauna en la Fed. 16 en el Área Núcleo Sonora ([Figura 7](#)). Esta carretera atraviesa toda la NRU pero no cruza ningún corredor de jaguares que sea obvio, y por ello la tarea de identificar los sitios de cruce óptimos se convierte en un desafío. Aunque la conectividad a lo largo de esta carretera es difusa, el valor de esta área para mantener la conectividad no se debe subestimar. La conectividad en el Área Núcleo Sonora es de importancia crítica para mantener el flujo genético a lo largo de la NRU. Dado que nuestro modelo indica que los jaguares pueden cruzar la Carretera 16 en cualquier punto, se debe estudiar el uso de hábitat y los patrones de movimiento de los jaguares para determinar el sitio óptimo para construir un cruce de fauna.

Nuestras consultas con expertos regionales en jaguares y el USFWS no identificaron carreteras de interés para realizar evaluaciones en el Área Secundaria Sinaloa ([Figura 8](#)). Se debe notar que,

sin embargo, un posible incremento futuro en el tránsito podría tener implicaciones negativas para la dispersión de los jaguares y que no puedan desplazarse entre las Áreas Núcleo Sonora y Jalisco. Aunque esta Área actualmente carece de una carretera de interés y es de menor preocupación en comparación a las otras Áreas, sería útil tener datos empíricos sobre el paisaje, datos de campo sobre los jaguares y tendencias sobre la modificación antrópica del hábitat, sobre todo para el desarrollo de nuevas infraestructuras de transporte o mejoramiento de las existentes.

El impacto del muro fronterizo entre Estados Unidos y México es de interés para los conservacionistas (ej. Cordova y de la Parra 2007, McCain y Childs 2008, Sayre y Knight 2009, Lasky et al. 2011). Aunque una evaluación completa del impacto de este muro sobre los jaguares está más allá del objeto de este reporte, nuestros resultados indican que el muro tiene el potencial de afectar el desplazamiento de los jaguares a través de la frontera internacional. La frontera entre México y EEUU en el Área Secundaria Fronteriza tiene una mezcla de vallas para peatones (que no permite el paso de jaguares), vallas para vehículos (vallas diseñada para impedir que los vehículos pasen, pero no los peatones y es lo suficientemente permeable como para permitir que pasen los jaguares), vallas antiguas para peatones y vehículos, y zonas sin vallas (principalmente áreas montañosas y escabrosas). Hay unos 83 km de hábitat conectivo a lo largo de la frontera; de éstos, aproximadamente 27 km tienen vallas para vehículos (32,5%) pero no tienen vallas para peatones ([Figura 6](#)). Aunque se cree que las vallas para vehículos dejan pasar los jaguares, el impacto de las vallas para la dispersión de los jaguares no se conoce, y se precisa de estudios para entender las respuestas de los jaguares a la valla.

Reiteramos que los resultados presentados aquí están basados en un modelo y aún no han sido validados en el campo ni con datos sobre los movimientos de los jaguares en estas áreas. Las respuestas de los jaguares a las carreteras son complejas y no son bien conocidas (Matthews et al. 2015). Muchos estudios han evaluado el diseño de cruces para fauna (ej. Clevenger y Waltho 2000), pero la selección del sitio para cruzar es igualmente importante y aún no se ha estudiado (Clevenger y Huijser 2011). Nuestro análisis de grano grueso, si bien es más específico que estudios previos sobre conectividad (ej. Rabinowitz y Zeller 2010), no es lo suficientemente refinado como para identificar los lugares precisos donde construir los cruces de fauna.

La selección del hábitat por parte de los jaguares está relacionada con más variables que las cinco tomadas en cuenta para nuestro modelo de aptitud del hábitat. Un examen a fina escala de los factores que influyen en el movimiento de los jaguares, tales como disponibilidad de presas, características del hábitat, y reacción de los jaguares hacia las carreteras y otros tipos de alteraciones antrópicas, podría ayudar a identificar los sitios prioritarios para realizar los esfuerzos de mitigación (Rabinowitz y Zeller 2010). Por ejemplo, los estudios con trampas cámara para estimar la ocupación de los jaguares en los corredores y áreas cercanas pueden determinar cómo los movimientos de los jaguares están restringidos en estas áreas y por ende, si son vulnerables a la fragmentación. De igual forma, los datos sobre mortalidad de los jaguares en las carreteras y registros de jaguares cruzando las carreteras ayudarán a seleccionar las técnicas de mitigación. Debido a la falta de datos empíricos sobre la respuesta de los jaguares a las carreteras y al hecho de que la fragmentación debido a las carreteras es una de las mayores amenazas a las poblaciones de carnívoros mayores, tal información es de alto valor en toda el área de distribución del jaguar.

Esta información comienza a llenar un vacío de información identificado por el Esquema de Recuperación del Jaguar (U.S. Fish and Wildlife Service 2012), y proporciona una guía para priorizar dónde las inversiones para la conservación y recuperación del jaguar pueden dar mejores resultados en el extremo norte de su distribución. Conocer la distribución de los corredores más importantes en la NRU es crucial para mantener la conectividad actual, así como anticipar los impactos de futuras modificaciones antrópicas en el paisaje y del cambio climático que a la larga afectaría la recuperación del jaguar en la NRU, así como en todo su rango.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbitt, R. F. J., J. M. Scott, y D. S. Wilcove. 2000. The geography of vulnerability: incorporating species geography and human development into conservation planning. *Biological Conservation* 96:169–175.
- Beckmann, J. P., A. P. Clevenger, M. P. Huijser, y J. A. Hilty, editors. 2010. *Safe passages*. Island Press, Washington D. C., USA.
- Beckmann, J. P. y J. A. Hilty. 2010. Connecting Wildlife Populations in Fractured Landscapes. Páginas 3–16 *en* *Safe Passages*. J. P. Beckmann, A. P. Clevenger, M. P. Huijser, y J. A. Hilty, eds. Island Press, Washington, D. C., USA.
- Beier, P. y R. F. Noss. 1998. Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology* 12:1241–1252.
- Brown, D. y C. López-González. 2000. Notes on the occurrences of jaguar (*Panthera onca*) in Arizona and New Mexico. *The Southwestern Naturalist* 45:537–542.
- Channell, R. y M. V. Lomolino. 2000. Dynamic biogeography and conservation of endangered species. *Nature* 403:26–29.
- Clevenger, A. P., y M. P. Huijser. 2011. *Wildlife crossing structure handbook, design and evaluation in North America*. Publication Number FHWA-CFL/TD-11-003. Federal Highway Administration, Washington D. C., USA.
- Clevenger, A. P., y N. Waltho. 2000. Factors Influencing the Effectiveness of Wildlife Underpasses in Banff National Park, Alberta, Canada. *Conservation Biology* 14:47–56.
- Colchero, F., D. A. Conde, C. Manterola, C. Chávez, A. Rivera, y G. Ceballos. 2011. Jaguars on the move: modeling movement to mitigate fragmentation from road expansion in the Mayan Forest. *Animal Conservation* 14:158–166.
- Cordova, A. y C. de la Parra, editores. 2007. *Una barrera a nuestro ambiente compartido: El muro fronterizo entre México y Estados Unidos*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, El Colegio de la Frontera Norte, Consorcio de Investigación y Política Ambiental del Suroeste, Ensenada, México.
- Crooks, K. R., C. L. Burdett, D. M. Theobald, C. Rondinini, y L. Boitani. 2011. Global patterns of fragmentation and connectivity of mammalian carnivore habitat. *Philosophical Transactions of the Royal Society: B* 366:2642–2651.
- Eizirik, E., J. Kim, M. Menotti-Raymond, P. G. Crawshaw, Jr., S. J. O'Brien, y W. E. Johnson. 2001. Phylogeography, population history, and conservation genetics of jaguar (*Panthera onca*, Mammalia, Felidae). *Molecular Ecology* 10:65–79.

- Estes, J. A., J. Terborgh, J. S. Brashares, M. E. Power, J. Berger, W. J. Bond, S. R. Carpenter, T. E. Essington, R. D. Holt, J. B. C. Jackson, R. J. Marquis, L. Oksanen, T. Oksanen, R. T. Paine, E. K. Pikitch, W. J. Ripple, S. A. Sandin, M. Scheffer, T. W. Schoener, J. B. Shurin, A. R. E. Sinclair, M. E. Soulé, R. Virtanen, y D. A. Wardle. Trophic downgrading of Planet Earth. *Science* 333(6040):301–306.
- Grigione, M. M., A. Scoville, G. Scoville, y K. Crooks. 2007. Neotropical cats in south-west Arizona: past and present distributions of jaguar, ocelots and jaguarundis. *Journal of Neotropical Mammalogy* 14:189–199.
- Grigione, M. M., K. Menke, C. López-González, R. List, A. Banda, J. Carrera, R. Carrera, A. J. Giordano, J. Morrison, M. Sternberg, R. Thomas, y B. Van Pelt. 2009. Identifying potential conservation areas for felids in the USA and Mexico: integrating reliable knowledge across an international border. *Oryx* 43:78–86.
- Hilty, J. A., W. Z. Lidicker Jr., y A. M. Merenlender. 2006. Corridor ecology: The science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation. Island Press, Washington, D. C., USA.
- Lasky, J. R., W. Jetz, y T. H. Keitt. 2011. Conservation biogeography of the US-Mexico border: a transcontinental risk assessment of barriers to animal dispersal. *Diversity & Distributions* 17:673–687.
- Matthews, S. M., J. P. Beckmann, y A. R. Hardy. 2015. Recommendations of road passage designs for jaguars. Wildlife Conservation Society draft report to the U.S. Fish and Wildlife Service in response to Solicitation F14PX00340, submitted 20 November 2014. 31 pp.
- McCain, E. B. y J. L. Childs. 2008. Evidence of resident jaguar (*Panthera onca*) in the southwestern United States and the implications for conservation. *Journal of Mammalogy* 89:1–10.
- McRae, B. H., B. G. Dickson, T. H. Keitt, y V. B. Shah. 2008. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology* 89:2712–2724.
- Nielsen, J. L., J. M. Scott, y J. L. Aycrigg. 2001. Endangered species and peripheral populations: cause for conservation. *Endangered Species Update* 18:194–197.
- Petracca, L. S., O. E. Ramírez-Bravo, y L. Hernández-Santín. 2013. Occupancy estimation of jaguar *Panthera onca* to assess the value of east-central Mexico as a jaguar corridor. *Oryx* 48:133–140.
- Polisar, J., S. M. Matthews, R. Sollman, M. J. Kelly, J. P. Beckmann, E. W. Sanderson, K. Fisher, M. Culver, R. Núñez, O. C. Rosas Rosas, C. A. López González, B. J. Harmsen, T. G. O'Brien, C. De Angelo, y F. C. C. Azevedo. 2014. Protocol of jaguar survey and monitoring techniques and methodologies. Wildlife Conservation Society report to the U.S. Fish and

- Wildlife Service in response to Solicitation F13PX01563, submitted 16 October 2014. 172 pp.
- Rabinowitz, A. y K. A. Zeller. 2010. A range-wide model of landscape connectivity and conservation for the jaguar, *Panthera onca*. *Biological Conservation* 143:939–945.
- Ripple, W. J., J. A. Estes, R. L. Beschta, C. C. Wilmers, E. G. Ritchie, M. Hebblewhite, J. Berger, B. Elmhagen, M. Letnic, M. P. Nelson, O. J. Schmitz, D. W. Smith, A. D. Wallach, y A. J. Wirsing. 2014. Status and ecological effects of the world's largest carnivores. *Science* 343: DOI: 10.1126/science.1241484.
- Rodriguez-Soto, C., O. Monroy-Vilchis y M. M. Zarco-Gonzalez. 2013. Corridors for jaguars (*Panther onca*) in Mexico: conservation strategies. *Journal for Nature Conservation* 21:438–443.
- Sanderson, E. W. y K. Fisher. 2011. Digital mapping in support of recovery planning for the northern jaguar. Wildlife Conservation Society report to the U.S. Fish and Wildlife Service in response to Solicitation F11AC00036, submitted 29 April 2011. 14 pp.
- Sanderson, E. W. y K. Fisher. 2013. Jaguar habitat modeling and database update. Wildlife Conservation Society report to the U.S. Fish and Wildlife Service in response to Solicitation F12PS00200, submitted 12 March 2013. 42 pp.
- Sanderson, E. W., K. H. Redford, C. B. Chetkiewicz, R. A. Medellin, A. R. Rabinowitz, J. G. Robinson, y A. B. Taber. 2002. Planning to save a species: the jaguar as a model. *Conservation Biology* 16:58–72.
- Sayre, N. F. y R. L. Knight. 2009. Potential effects of United States-Mexico border hardening on ecological and human communities in the Malpai Borderlands. *Conservation Biology* 24:345–348.
- Shah, V. B. y B. McRae. 2008. Circuitscape: a tool for landscape ecology in *Proceedings of the 7th Python in Science conference (SciPy 2008)*, Varoquaux, G., T. Vaught, and J. Millman (Eds.), pp. 62–65.
- U.S. Fish and Wildlife Service. *En prep.* Draft Recovery Plan for the Jaguar (*Panthera onca*). U.S. Fish and Wildlife Service, Southwest Region, Albuquerque, New Mexico.
- U.S. Fish and Wildlife Service. 2012. Recovery Outline for the Jaguar (*Panthera onca*). Albuquerque, New Mexico, USA.
- U.S. Fish and Wildlife Service. 2014. Endangered and threatened wildlife and plants; designation of critical habitat for jaguar; final rule. *Federal Register* 79:12572–12654.
- Zeller, K. 2007. Jaguar in the New Millennium Data Set Update: The State of the Jaguar in 2006. Wildlife Conservation Society, Bronx, New York, USA.

GLOSARIO

Áreas Núcleo

Áreas en una unidad de recuperación del jaguar con evidencias para la supervivencia a largo plazo del jaguar (U.S. Fish and Wildlife Service 2012). Las áreas núcleo tienen tanto registros persistentes y verificados de los jaguares como evidencias recientes de reproducción.

Criterios para las áreas núcleo:

- 1) Evidencia confiable de presencia histórica y actual de poblaciones de jaguares.
- 2) Evidencia reciente (de los últimos 10 años) de reproducción.
- 3) Que contenga hábitat de calidad y cantidad para albergar poblaciones de jaguares y de suficiente tamaño como para contener al menos 50 jaguares adultos.

Áreas Secundarias

Áreas que contienen hábitat apto para el jaguar con registros históricos y/o recientes de jaguares pero sin (o con muy pocos) registros de reproducción (U.S. Fish and Wildlife Service 2012). Estas áreas son de particular interés cuando están entre áreas núcleo y pueden usarse como zonas de tránsito a través de las cuales los individuos pueden dispersarse, llegar a áreas cercanas, y reproducirse. Los jaguares pueden tener densidades bajas en las áreas secundarias a causa de la cacería, y, si en el futuro se registra reproducción en un área secundaria, el área podría ser considerada como un área núcleo.

Criterios para las áreas secundarias:

- 1) Comparados con las áreas núcleo, las áreas secundarias son generalmente más pequeñas, contienen menos jaguares y a densidades más bajas, y tienen registros esporádicos históricos y actuales. Puede haber pocas evidencias de ocupación debido a que el área no está bien estudiada, resultando en un estado desconocido de estas áreas.
- 2) Hay poca o nula evidencia (en los últimos 10 años) de reproducción.
- 3) La calidad y cantidad de hábitat es baja comparada con las áreas núcleo.

Corredor

Un hábitat lineal, insertado en una matriz diferente, que conecta dos o más bloques grandes de hábitat y que se propone para su conservación y que mejorará o mantendrá la viabilidad de poblaciones específicas de fauna en el paisaje (Beier and Noss 1998).

Hábitat apto

El área con un índice de aptitud mayor a 0, basado en la cobertura boscosa, superficie del terreno, distancia al agua, influencia humana, y ecorregiones (Sanderson y Fisher 2013).

Hábitat conectivo

Cualquier pixel de hábitat que tiene un valor predictivo de conectividad mayor a cero.

Hábitat crítico

Hábitat federalmente designado que es crítico para la conservación de una especie amenazada. Existen 3.093 km² de hábitat crítico para el jaguar en EEUU.

Hábitat de alta calidad

Hábitat que es muy apto para los jaguares, como se definió por el subgrupo técnico del Equipo de Recuperación del Jaguar (U.S. Fish and Wildlife Service 2012, Sanderson y Fisher 2011, 2013).

Hábitat fuente

Para los propósitos de este ejercicio de modelado, el hábitat fuente es el equivalente ecológico a los *nodos*, que indica las áreas más al norte y más al sur de hábitat en la NRU, entre las cuales los jaguares se desplazan.

Modelo de conectividad

El resultado de *Circuitscape* que representa la conectividad del hábitat predicha en el área de estudio. Ver también *superficie de conectividad*.

Nodo(s)

Los parches de hábitat que *Circuitscape* intenta conectar. El equivalente del modelo a *hábitat fuente*.

Parches de hábitat apto

Todos los pixels de hábitat en el Área Secundaria Fronteriza con un valor de aptitud mayor a cero.

Parches de hábitat núcleo

Los parches de hábitat derivados del modelo de aptitud del hábitat descrito por Sanderson y Fisher 2013. A cada pixel se le asignó un puntaje para la cobertura boscosa, la superficie del suelo, la distancia al agua, elevación y tipo de hábitat, y estos puntajes fueron combinados. Subsecuentemente, los parches menores a 100 km² en tamaño y todos los pixeles con alta influencia antrópica fueron eliminados. Ver una explicación detallada en Sanderson y Fisher 2013.

Parches totales de hábitat

Los parches de hábitat creados a partir de combinar todos los hábitats aptos en el Área Secundaria Fronteriza y todos los hábitats núcleo en las Áreas Núcleo Sonora, Secundaria Sinaloa y Núcleo Jalisco en la NRU.

Probabilidad de conectividad

La probabilidad de que un jaguar se desplace por un pixel versus cualquier otro pixel vecino. Una probabilidad baja indica que hay muchos pixeles aptos cercanos y una alta probabilidad indica que hay pocos pixeles aptos cercanos.

Superficie de conducción

Uno de los datos de ingreso para el programa *Circuitscape*, en el cual los valores del pixel son una representación relativa de la facilidad con la que un jaguar puede desplazarse en el área de estudio. La superficie de conducción usada en estos análisis fue el modelo de sostenibilidad del hábitat descrito en Sanderson y Fisher 2013.

Superficie de conectividad

El resultado de *Circuitscape* que representa la conectividad de hábitat predicha en el área de estudio. “Superficie” en general se refiere a la capa SIG. Ver también *modelo de conectividad*.

Cuadro 1. Superficie de hábitat apto y núcleo y número de parches de hábitat por Área en la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar. Calculamos la cantidad de hábitat apto usando el método descrito por Sanderson y Fisher (2013). Creamos parches de hábitat en el Área Secundaria Fronteriza usando todos los hábitats disponibles (parches de hábitat apto). Derivamos los parches de hábitat en las otras tres Áreas seleccionando solo los hábitats de alta calidad en parches contiguos mayores a 100 km² y con poca influencia relativa antrópica (parches de hábitat núcleo).

	Área Secundaria Fronteriza – EEUU	Área Secundaria Fronteriza - MX	Área Núcleo Sonora	Área Secundaria Sinaloa	Área Núcleo Jalisco	TOTAL
Área Total (km ²)	29.021	33.955	77.710	31.191	54.949	226.826
Hábitat Apto (km ²)	6.839	22.901	67.931	28.723	44.460	170.854
Número de Parches de Habitat Apto		34	0	0	0	
Hábitat Núcleo (km ²)	0	423	28.310	18.790	26.267	73.790
Número de Parches de Hábitat Núcleo		1	4	1	4	

Cuadro 2. Carreteras de interés evaluadas en nuestro estudio y número de veces que cada una interseca un corredor predictivo para la conectividad en la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar. Seleccionamos las carreteras de acuerdo a la opinión de expertos en jaguares y el U.S. Fish and Wildlife Service. I=Interestatal (EEUU); SR=Ruta Estatal (EEUU); Fed.=Carretera Federal (México).

Carretera	Tipo de Carretera	Área	# Intersecciones con Corredores	Largo Total de la Intersección (km)
I-19	4 carriles federal	Área Secundaria Fronteriza (EEUU)	0	n/a
SR 82	2 carriles estatal	Área Secundaria Fronteriza (EEUU)	2	30
SR 83	2 carriles estatal	Área Secundaria Fronteriza (EEUU)	1	15
Fed. 2	4 carriles federal	Área Secundaria Fronteriza (MX)	2	47
Fed. 15	4 carriles federal	Área Secundaria Fronteriza (MX)	1	6
Fed. 16	4 carriles federal	Área Núcleo Sonora	0	n/a
Fed. 40	4 carriles federal	Área Núcleo Jalisco	1	14
Fed. 150	4 carriles federal	Área Núcleo Jalisco	3	10
Total			10	122



Figura 1. Mapa de la Unidad de Recuperación Noreste del Jaguar (NRU), actualizado por Sanderson y Fisher (2013). La NRU abarca 226.826 km² desde el sudoeste de Nuevo México y sudeste de Arizona en Estados Unidos, hacia el sur entrando a México por la cadena montañosa Sierra Madre Occidental hasta Colima. En la NRU hay dos “Áreas Núcleo” con registros continuos y verificados de jaguares y evidencia reciente de reproducción, y dos “Áreas Secundarias”, con registros históricos y/o recientes de jaguares pero con pocos o ningún registro de reproducción.



Figura 2. Puntuación de la aptitud del hábitat en la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar. Se combinaron cinco variables ambientales – cobertura boscosa, superficie del suelo, distancia al agua, influencia antropogénica y ecorregión – para estimar el puntaje de la aptitud del hábitat. Ver [Figure 1](#) para mayor información sobre las Áreas Núcleo y Secundarias (Sanderson y Fisher 2013).



Figura 3. Los 8 parches de hábitat núcleo usados para estimar la conectividad de hábitat para los jaguares en la Unidad de Recuperación Noroeste. Los parches en México se derivaron del modelo de aptitud del hábitat seleccionando sólo los hábitats de alta calidad en parches contiguos mayores a 100 km² y con baja influencia antrópica.

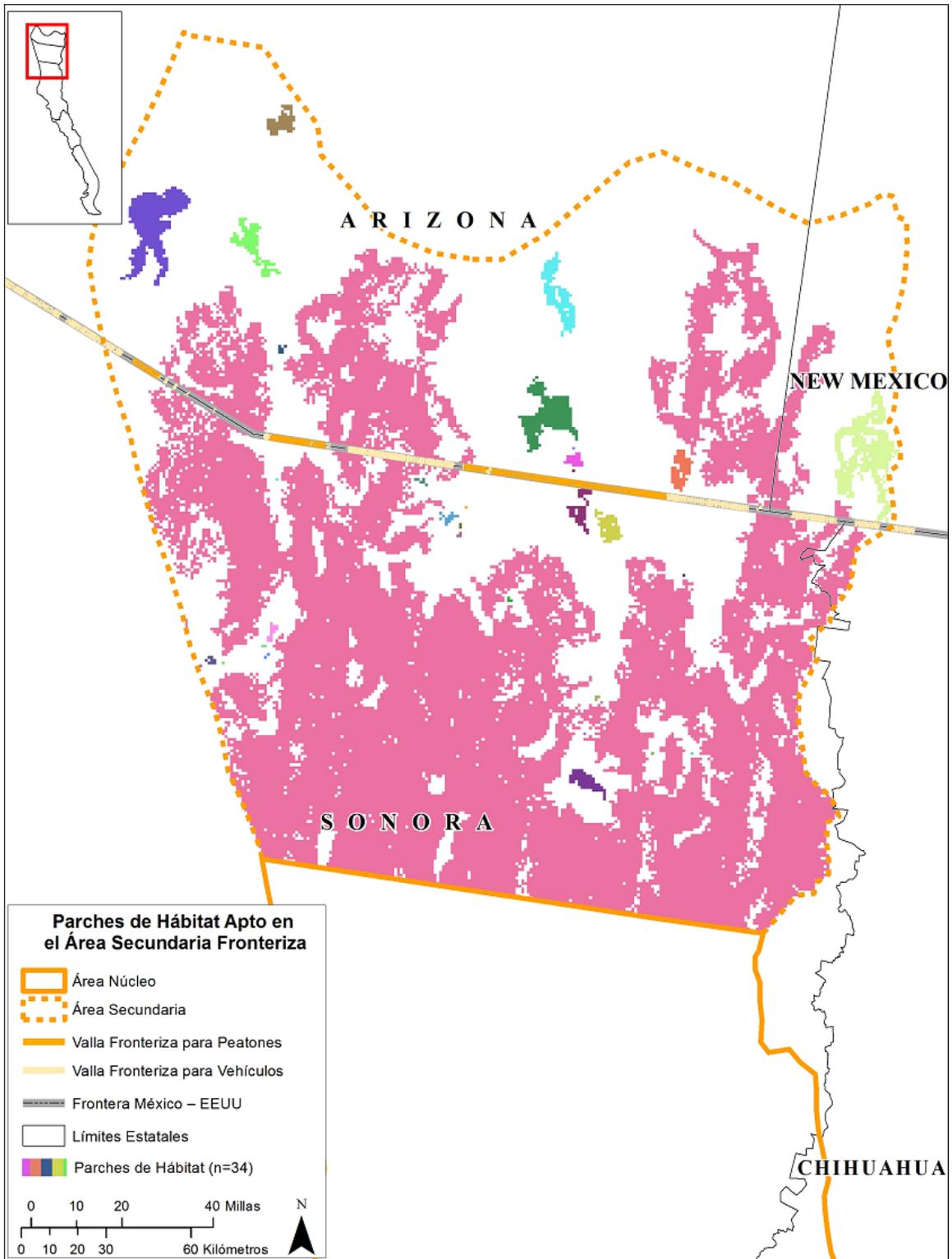


Figura 4. Los 34 parches de hábitat apto en el Área Secundaria Fronteriza usados para predecir la conectividad del hábitat para jaguares en la Unidad de Recuperación Noreste. Los parches en el Área Secundaria Fronteriza estaban compuestos por todo el hábitat apto del Área, como fue modelado en Sanderson y Fisher 2013.

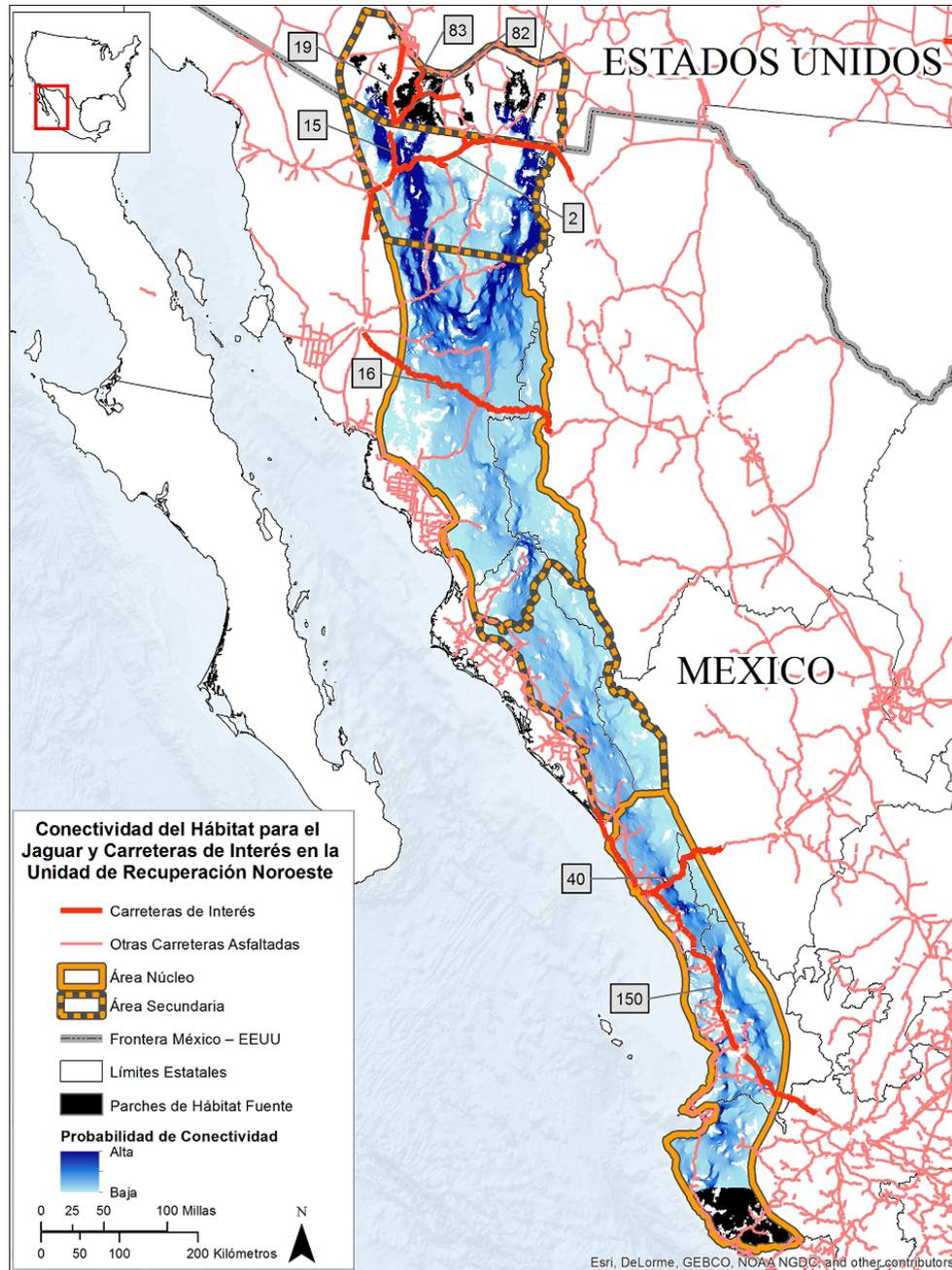


Figura 5. Predicción de la conectividad de los hábitats para el jaguar y carreteras de interés en la Unidad de Recuperación Noroeste (NRU). Creamos este modelo usando el programa Circuitscape, el cual predice la conectividad aplicando la teoría de circuitos eléctricos a una serie de nodos (parches de hábitat fuente) y una superficie de conducción (el modelo de aptitud de hábitat en la [Figura 2](#)). Los corredores, donde las probabilidades de conectividad son altas, indican áreas donde hay menos rutas disponibles para el desplazamiento de los jaguares. Estimamos las intersecciones entre la conectividad y las carreteras de interés en los EEUU y en México, etiquetadas en color gris en el mapa: Interestatal-19, Ruta Estatal 82, y Ruta Estatal 83 en EEUU, Carreteras Federales 2, 15, 16, 40 y 150 en México.

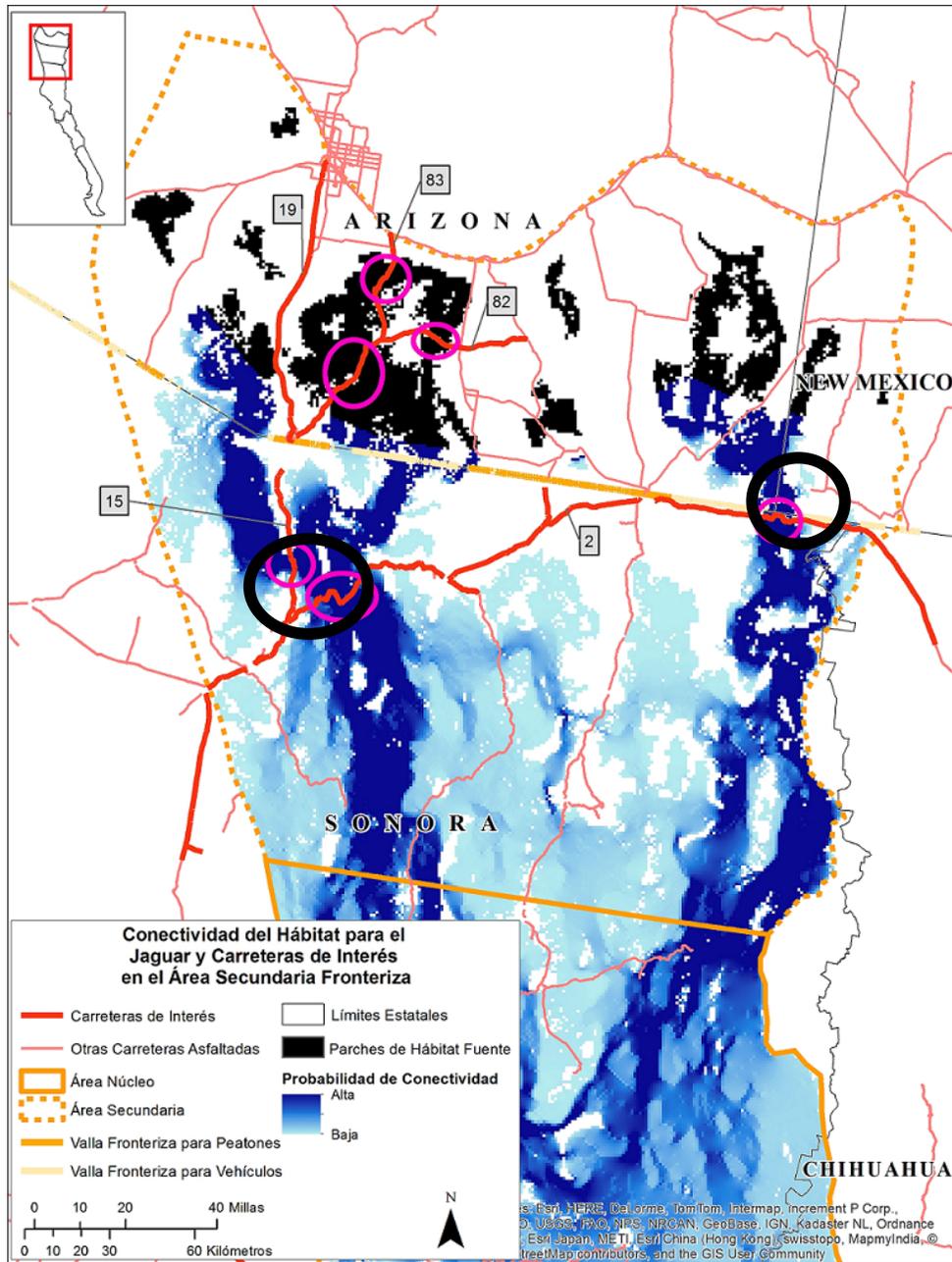


Figura 6. Conectividad del hábitat para jaguares y carreteras de interés en el Área Secundaria Fronteriza (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). Un examen visual de este modelo de conectividad que se extiende a través de toda la Unidad De Recuperación del Noroeste revela tres corredores que se extienden a lo largo de la frontera entre México y EEUU. Estos corredores se cruzan con las Carreteras Federales 2 y 15 en México. Las Rutas Estatales 82 y 83 en EEUU también se cruzan con parches de hábitat fuente, lo que podría impactar la conectividad para los jaguares. Estas áreas son ideales para realizar evaluaciones con el fin de determinar su potencial para instalar estructuras de cruce.

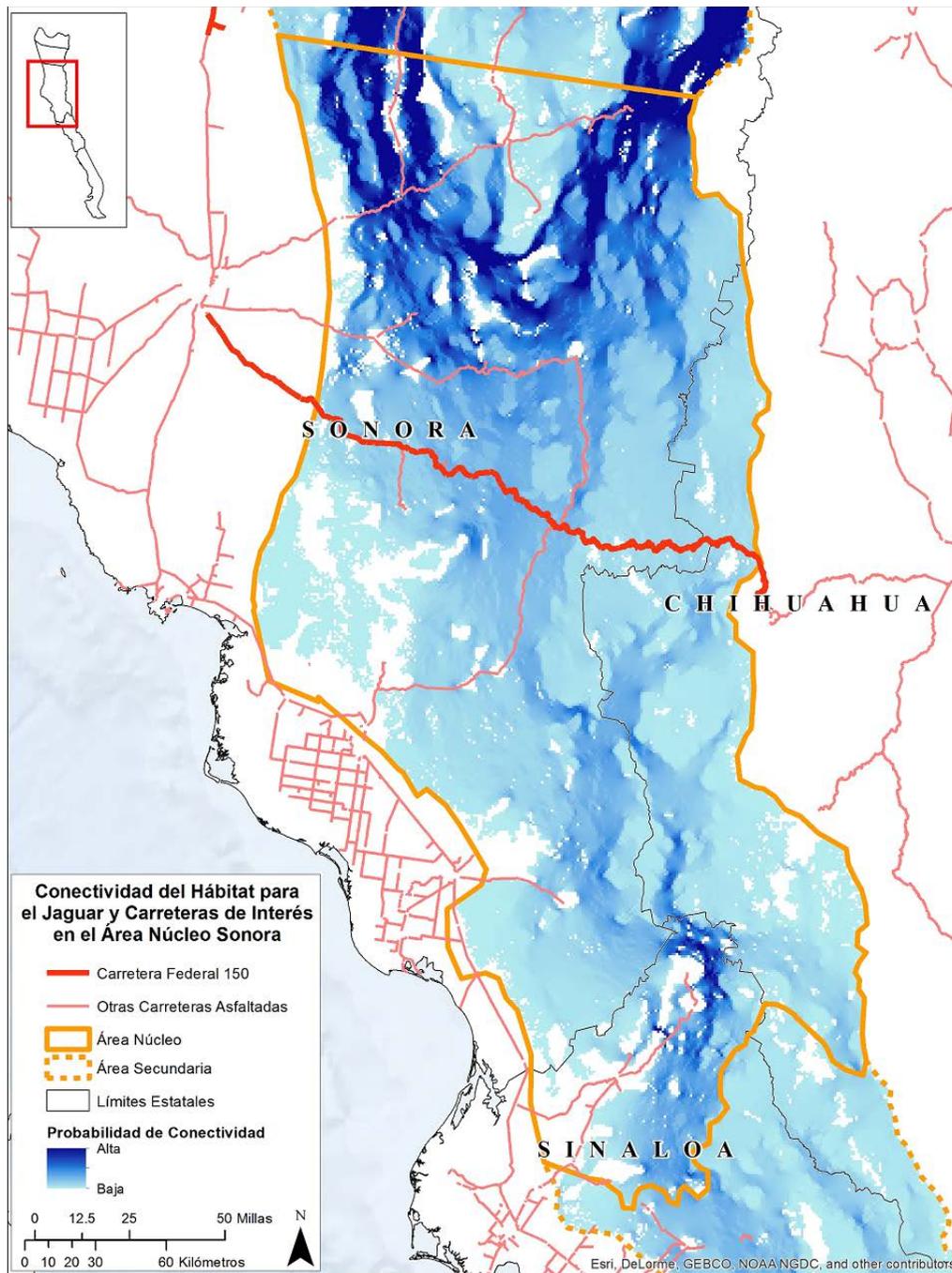


Figura 7. Conectividad del hábitat para jaguares y carreteras de interés en el Área Secundaria Fronteriza (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). La conectividad es difusa en la parte central del Área Núcleo Sonora, pero se estrecha hacia un corredor más obvio en la parte sur del Área. Aunque la carretera federal 16 de México, representada aquí, no se cruza con ningún corredor, aún tiene el potencial de actuar como barrera para la dispersión de los jaguares. Se necesitan estudios de campo para identificar las ubicaciones precisas para futuros esfuerzos de mitigación vial.

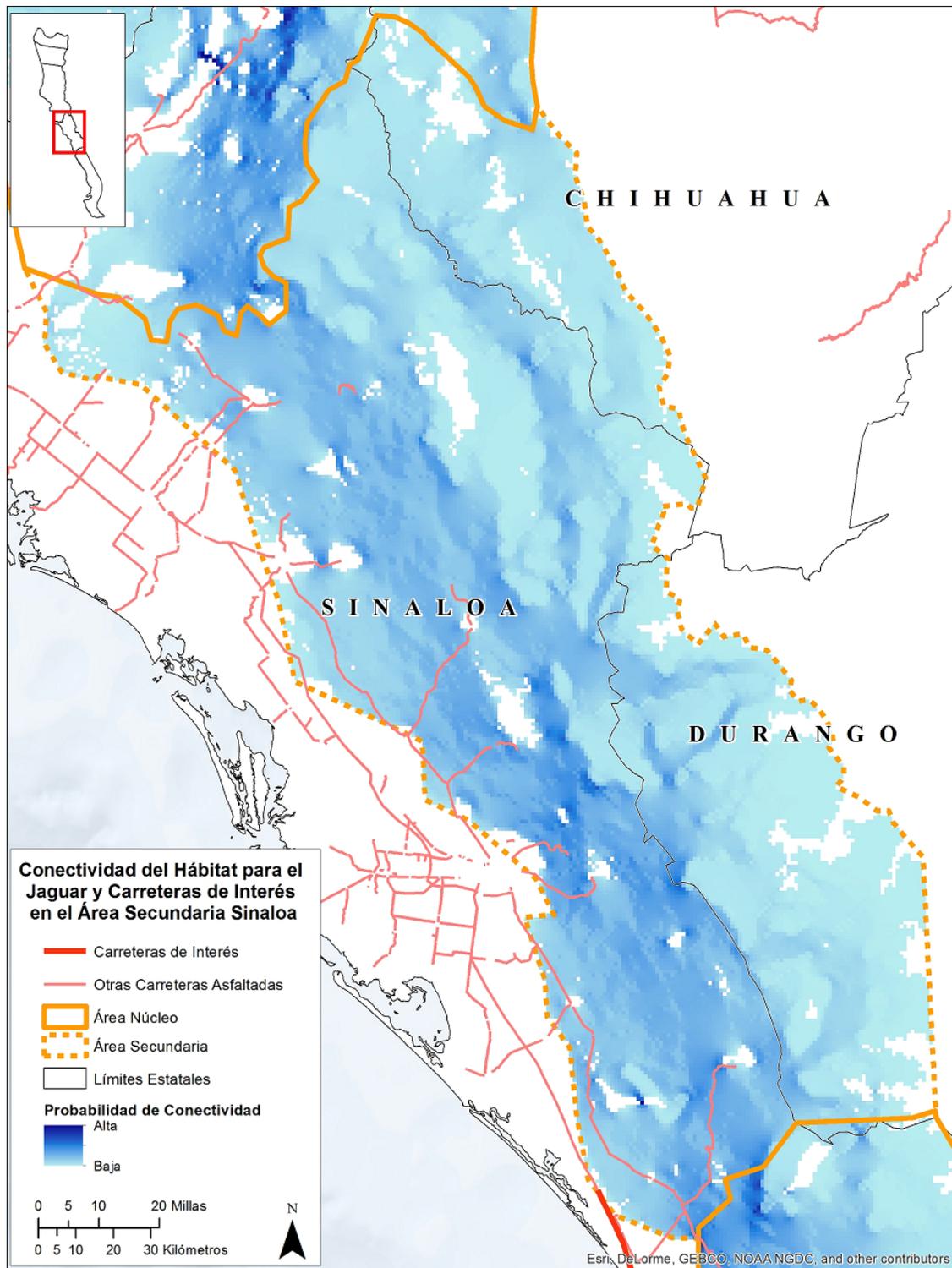


Figura 8. Conectividad del hábitat y carreteras de interés en el Área Secundaria Sinaloa de la Unidad de Recuperación Noroeste del jaguar (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). Las probabilidades de conectividad son difusas en esta Área Núcleo, pero aparece un corredor claro de norte a sur en la parte central de esta Área. No hay carreteras de interés cruzando esta área.

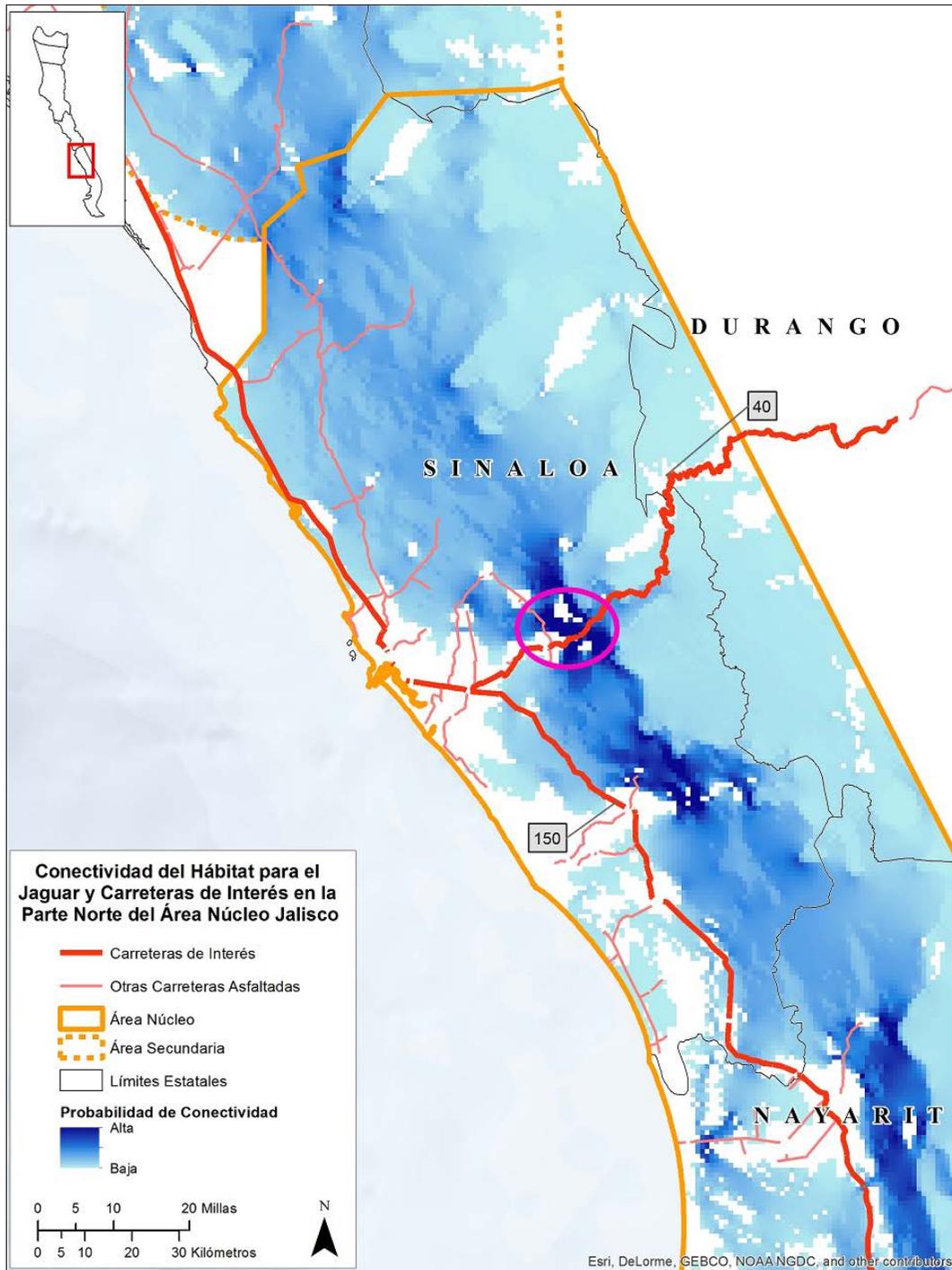


Figura 9. Conectividad del hábitat y carreteras de interés en la porción norte del Área Núcleo Jalisco de la Unidad de Recuperación Noroeste del jaguar (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). La conectividad está concentrada cerca del centro del Área Núcleo, corriendo principalmente de norte a sur. La Carretera Federal 40 cruza un corredor, indicado con un círculo. El área resaltada es apta para estudios mayores y como sitio para potenciales estructuras de cruce de fauna.

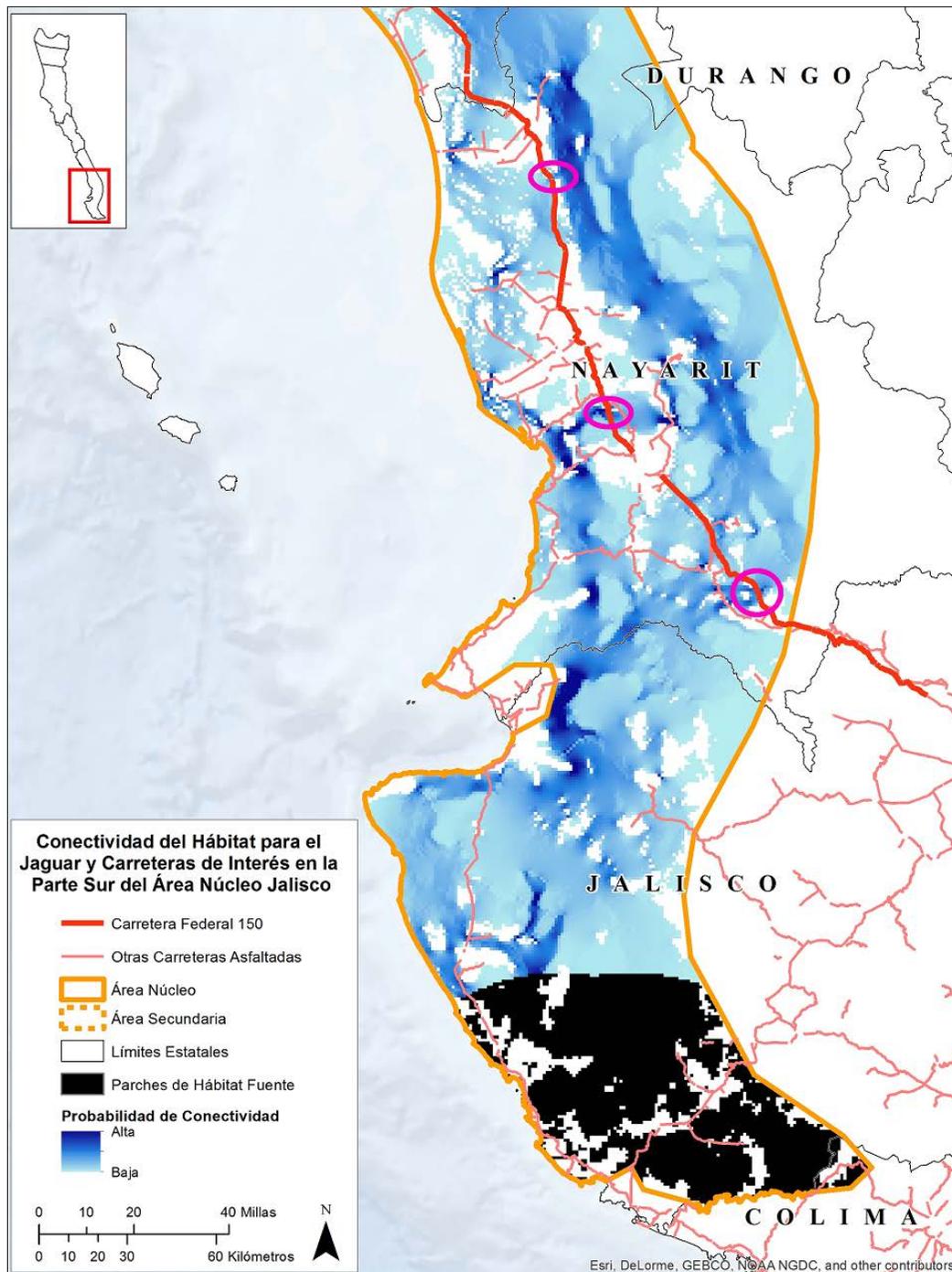


Figura 10. Conectividad del hábitat y carreteras de interés en la porción sur del Área Núcleo Jalisco de la Unidad de Recuperación Noroeste del Jaguar (algunas partes de las carreteras en áreas densamente pobladas fueron omitidas). La conectividad está concentrada en varios corredores de norte a sur en esta parte del Área Núcleo. En particular, la Carretera Federal 150 de México cruza 3 corredores, marcados con círculos rosados, que son ideales para futuros estudios y para potenciales estructuras de cruce de fauna.

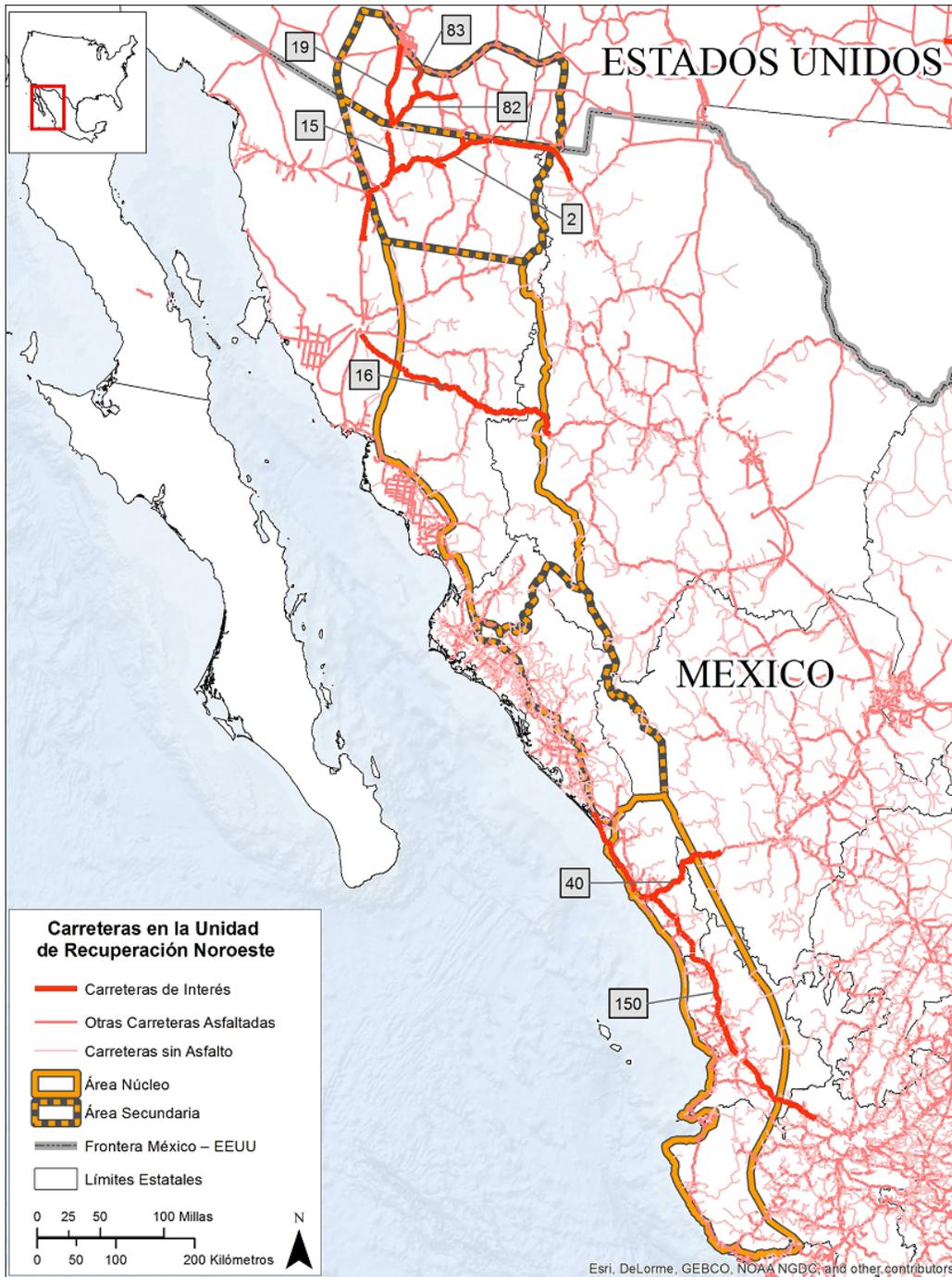


Figura 11. Carreteras de interés en la Unidad de Recuperación Noroeste. Todas las carreteras pueden afectar el desplazamiento de los jaguares en diferentes grados; sin embargo, las carreteras de alto tránsito de 2 y 4 carriles (Carreteras 2, 16, 40 y 150 en México) podrían tener el mayor potencial de interferir con los movimientos de los jaguares y por eso se separaron para un mayor análisis. Adicionalmente, otras carreteras que intersectan hábitat fuente y que tienen el potencial de convertirse en carreteras de alto tránsito en el futuro (Carreteras 19, 82 y 83 en EEUU) fueron separadas para un análisis futuro.