

Recomendaciones para el Diseño de Cruces de Caminos para Jaguares

**Presentación para el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos
como cumplimiento parcial del Contrato F14PX00340**



© Jeff Burrell



Sean M. Matthews, Jon P. Beckmann, y Amanda R. Hardy
23 de Enero de 2015 (actualizado 22 de Septiembre de 2015)

Tabla de Contenido

Resumen Ejecutivo	1
Introducción	3
Sugerencias para modificar el comportamiento de los conductores.....	4
Sugerencias para Cambiar el Comportamiento Animal.....	5
Recomendaciones para Guiar los Jaguares de Forma Segura Sobre o Bajo las Carreteras. 6	
Pasos Elevados	7
Pasos Subterráneos	8
Vallas.....	11
Distancia Entre las Estructuras.....	13
Monitoreo y Evaluación	13
Datos de Accidentes Fauna-Vehículos	15
Parcelas de Huellas	16
Monitoreo Fotográfico y con Video	17
Radio-Telemetría de los Movimientos de la Fauna Silvestre	17
Resumen de Monitoreo y Evaluación.....	18
Costos	18
Ruta 77 del Estado de Arizona: Conexión Santa Catalina – Tortolita	19
Ruta Estatal 86 en Arizona: Conexión Kitt Peak	20
Resumen.....	21
Bibliografía	23

Cita Sugerida: Matthews, S. M., J. P. Beckmann, y A. R Hardy. 2015. Recomendaciones para el diseño de cruces de caminos para jaguares. Reporte Final de Wildlife Conservation Society para U.S. Fish and Wildlife Service en respuesta a la Solicitud F14PX00340, enviada el 23 de enero de 2015 (actualizado 22 de septiembre de 2015). 32 pp.

Resumen Ejecutivo

Las redes de caminos fragmentan el paisaje natural y crean barreras que interfieren con la capacidad de los animales de moverse entre los hábitats para satisfacer sus necesidades biológicas, tales como encontrar comida, agua, refugio y dispersarse a nuevas áreas para aparearse e incrementar la diversidad genética. La mortalidad de animales silvestres debido a los accidentes viales puede tener impactos directos a nivel de población; por ejemplo, la mortalidad en carreteras está entre las mayores amenazas a la supervivencia de 21 especies amenazadas en los EEUU (Huijser et al. 2008). Para muchas especies sensibles o que están en peligro, el impacto de los caminos es desconocido. El Proyecto de Recuperación del Jaguar (*Panthera onca*) del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EEUU (U.S. Fish and Wildlife Service 2012) identificó la necesidad de evaluar el impacto de los caminos sobre los jaguares y las medidas para permitir que estos raros carnívoros crucen de forma segura los caminos con el fin de optimizar la recuperación de esta especie. Este documento se enfoca en estas medidas proporcionando recomendaciones a partir de una vasta literatura y estudios de caso sobre las técnicas que tienen un alto potencial para facilitar un movimiento seguro del jaguar en caminos en el límite norte de su distribución histórica en México y el sudoeste de Estados Unidos (o sea, la Unidad de Recuperación del Noroeste).

Los impactos de los caminos y el tránsito sobre la fauna silvestre se pueden reducir de tres maneras que incluyen mejorar la actitud de los conductores, cambiar el comportamiento de los animales, o separar físicamente los animales del tránsito en las carreteras. Esta última técnica, que se aplica usando estructuras para que los animales crucen las carreteras y con barreras que guían a los animales hacia los pasadizos sobre o debajo de los caminos, ha demostrado ser la más exitosa reduciendo las coaliciones entre animales y vehículos, mientras permiten que los animales se muevan en el paisaje.

Este reporte presenta recomendaciones sobre las mejoras para los cruces de caminos para jaguares en una variedad de hábitats en la Unidad de Recuperación del Noroeste ([Figura 1](#)). Este reporte incluye recomendaciones para mejorar la actitud de los conductores, modificar el comportamiento de los animales y sobre las estructuras físicas para guiar a la fauna silvestre a cruzar de forma segura los cruces sobre/debajo de los caminos (Matthews et al. 2014). Debido a que estas estructuras son casi inexistentes para jaguares o no están estudiadas a lo largo del rango del mismo, nuestras recomendaciones están basadas en la literatura que se enfoca en grupos taxonómicos afines, como los grandes carnívoros en forma general, o los pumas (*Puma concolor*) específicamente.

Los pumas, otros carnívoros mayores y sus presas tienen un comportamiento específico sobre el uso de pasos elevados o subterráneos. Recomendamos la construcción de pasos elevados y subterráneos grandes para jaguares y sus presas con barreras que guíen a los animales para cruzar estas estructuras, y prevenir que los animales trepen las barreras o caven bajo ellas. Estas estructuras son más efectivas si están diseñadas y construidas lo suficientemente anchas y con

bermas en los bordes (en el caso de pasos elevados) para prevenir que los animales vean el tránsito bajo ellos. Más aún, sugerimos que la zona circundante a estas estructuras de cruce tenga una buena cobertura vegetal, estén a una distancia considerable de centros urbanos, actividades humanas o fuentes de luz artificial y estén construidas de manera que no obstruyan la vista del paisaje a lo lejos de la estructura. Además de las técnicas de modelado y la opinión de los expertos para identificar donde se pueden ubicar estos cruces de manera que sean más susceptibles de ser utilizados por el jaguar y sus presas, la evaluación puntual del paisaje y las actividades humanas, junto con el monitoreo de los movimientos de la fauna silvestre antes y después de la construcción, son elementos clave en la selección de ubicaciones óptimas para las estructuras de cruce y para evaluar su éxito.

Recomendaciones para el Diseño de Cruces de Caminos para Jaguares
Presentación para el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos
como cumplimiento parcial del Contrato F14PX00340

Introducción

Mantener la conectividad de los jaguares desde el sur de Arizona y Nuevo México hasta la Sierra Madre Occidental de México es una prioridad de conservación (Zeller 2007, Rabinowitz y Zeller 2010, U.S. Fish and Wildlife Service 2012). Los estudios de variación genética entre jaguares han mostrado poca evidencia de una importante división geográfica y de barreras al flujo genético en un amplio rango (Eizirik et al. 2001, Johnson et al. 2002, Ruiz-García et al. 2009). Debido a esto y a los beneficios demográficos de la conectividad, mantener ésta entre las áreas donde hay jaguares reproductivos se transforma en un componente esencial en los planes de conservación para la especie (Rabinowitz and Zeller 2010).

Los caminos y el tráfico asociado a éstos pueden cortar la conectividad y afectar negativamente las poblaciones de fauna silvestre en cuatro maneras: 1) disminuyen la cantidad, calidad y disponibilidad de hábitat; 2) incrementan la mortalidad debido a accidentes con vehículos; 3) limitan los movimientos y acceso a recursos dentro y fuera del rango de los animales y 4) fragmentan el hábitat y las poblaciones silvestres en subpoblaciones más pequeñas y vulnerables (Maehr 1997, Forman y Alexander 1998, Smith 1999, Forman et al. 2003, Mills y Conrey 2003, Jaeger et al. 2005, Riley et al. 2006, Strasburg 2006). La pérdida de hábitat puede ser directa, en forma de remoción del hábitat cuando la carretera es construida o puede ser indirecta, cuando la calidad del hábitat en las cercanías a las carreteras se ve afectada por el ruido, luces, polución y otros impactos asociados a los caminos. El incremento en la tasa de mortalidad debido a accidentes entre vehículos y fauna puede comprometer la supervivencia de la población si es que las tasas de natalidad no compensan estas tasas de mortalidad, y afectan la estructura social, especialmente para felinos grandes territoriales (Fuller 1989, Ferreras et al. 1992, van der Zee et al. 1992). Para algunas especies, el ruido y los movimientos de los vehículos pueden restringir su desplazamiento y el acceso a recursos, incluyendo comida, pareja y lugares para reproducirse. Estas barreras a los movimientos y a la dispersión, junto con un acceso reducido a los recursos pueden llevar a bajar las tasas de reproducción y supervivencia (Brody y Pelton 1989, Reijnen y Foppen 1994, Ortega y Capen 1999, Forman et al. 2003, Beckmann et al. 2010), aumentar la subdivisión poblacional restringiendo el flujo de individuos y de material genético entre subpoblaciones y, por ende, amenazar la supervivencia de la población (Swihart y Slade 1984, Noss et al. 1996, Gerlach y Musolf 2000).

En todo el rango de distribución del jaguar en general y en la Unidad de recuperación del Noroeste en particular (NRU; [Figura 1](#)), se precisa de mayor información sobre los impactos de los caminos sobre los movimientos del jaguar y sobre la efectividad de los pasos elevados y subterráneos y otras acciones para facilitar el desplazamiento de los jaguares a través de los caminos o carreteras (U.S. Fish and Wildlife Service 2012). Para incrementar la supervivencia a largo plazo de las subpoblaciones de jaguares se recomienda mantener y mejorar (cuando sea necesario) la conectividad para el movimiento de los jaguares en el paisaje y entre las poblaciones, y se sugiere el uso de cruces de caminos para disminuir el riesgo de mortalidad asociado a los caminos y facilitar el movimiento de los jaguares (U.S. Fish and Wildlife Service 2012).

Este reporte presenta recomendaciones para mejorar los cruces para jaguares en caminos en una variedad de hábitats en la NRU ([Figura 1](#)). Estas recomendaciones están basadas en nuestra revisión sobre técnicas para reducir los conflictos entre fauna silvestre y autotransporte, incluyendo esfuerzos para mejorar el comportamiento de los conductores y de los animales y las estructuras físicas para guiar a los animales a cruzar sobre/debajo de las carreteras (Matthews et al. 2014). Estas recomendaciones están seguidas por un reporte que identifica las áreas potenciales donde las acciones mejorarán el tránsito de los jaguares por diferentes tipos de cruces de caminos que pueden ser efectivos en una gran variedad de hábitats (Stoner et al. 2014). Debido a la falta de ejemplos específicos de jaguares sobre los cuales inferir, nuestras recomendaciones están sobre todo basadas en bibliografía sobre felinos similares, tales como pumas (*Puma concolor*), y otros carnívoros, con el supuesto de que esos animales pueden responder de forma similar a los cruces de caminos.

Sugerencias para modificar el comportamiento de los conductores.

Las medidas de mitigación orientadas a influir sobre el comportamiento de los conductores han tenido resultados ambiguos (Huijser et al. 2008, Huijser y McGowen 2010). Estas medidas van desde difusión pública y educación hasta varios tipos de letreros de peligro permanentes, letreros de peligro estacionales, sistemas de detección de animales que alertan a los conductores sobre la presencia de animales en el camino en tiempo real, y medidas que aumentan la visibilidad de los conductores. No se ha podido demostrar que los letreros de peligro tradicionales y los letreros con tecnología avanzada (como letreros con luces y flashes o con mensajes dinámicos) modifican significativamente el número de coaliciones entre fauna y vehículos (Pojar et al. 1975, Rogers 2004, Meyer 2006, Stanley et al. 2006).

Contrariamente a los letreros estáticos que anuncian presencia de fauna, recomendamos un estudio más profundo sobre el uso de sistemas de alerta sobre la presencia de fauna en la carretera. Estos sistemas usan sensores para detectar animales grandes que se acercan a la pista, y activan señales de peligro que alertan a los conductores sobre la presencia de animales. La efectividad de sistemas confiables de detección de animales para reducir accidentes con ungulados grandes se ha estimado en un 82% (Mosler-Berger y Romer 2003) y en un 91% (Dodd

y Gagnon 2008). Sin embargo, dependiendo del tipo de tecnología de detección utilizada (ej. radares, microondas, sistemas de interrupción rayo), las probabilidades de detección son potencialmente más altas para animales grandes, tales como ungulados, que para animales pequeños (Huijser et al. 2009c). La confiabilidad de estos sistemas para los carnívoros grandes no es conocida, aunque las tasas de éxito probablemente serán menores para carnívoros en comparación con los ungulados, un tema que merece mayor investigación (Huijser et al. 2009). Además, los sistemas de detección de fauna en los caminos son más efectivos detectando la presencia de animales en hábitats más abiertos y existen menos probabilidades de incurrir en falsos positivos que pueden llegar a reducir la confianza de los conductores en este sistema, un tema a considerar en la gran variedad de hábitats ocupados por los jaguares, especialmente en la vegetación tropical densa en las regiones del geotrópico del hemisferio oeste. [Huijser et al. \(2009:22\)](#) describen las características y la efectividad de 9 sistemas de detección de animales; los costos del equipo están entre los 260\$US y 17.300\$US para un sistema en un solo punto de ubicación.

Huijser y McGowen (2010) reconocen que hay varias ventajas de los sistemas de detección de animales comparadas con las estructuras para que la fauna cruce, incluyendo 1) los sistemas de detección tienen el potencial de dejar que la fauna cruce de manera segura en cualquier parte de la carretera que sea apropiada para este sistema; 2) están menos restringidos a los movimientos de la fauna que las vallas o las estructuras de cruce; 3) pueden instalarse sin mayores infraestructuras o control de tráfico por largos períodos; y 4) suelen ser más baratos que las estructuras para el cruce de fauna. Entre las desventajas de los sistemas de detección de animales están que su funcionamiento poco confiable y a veces esporádico bajo ciertas condiciones (ej. durante tormentas o mucho viento que dan “detecciones falsas de animales”), aunque estas limitaciones se están mejorando con más investigaciones sobre estos sistemas (Huijser et al. 2009).

Sugerencias para Cambiar el Comportamiento Animal.

Existen dos métodos básicos para modificar el comportamiento animal a fin de reducir los impactos sobre la fauna: 1) evitar que los animales se acerquen a los caminos, o 2) dirigir el desplazamiento de la fauna hacia lugares de cruce seguros. Evitar que la fauna se acerque a las carreteras tiene el potencial de reducir los accidentes entre vehículos y animales, pero tiene las consecuencias negativas asociadas a limitar los movimientos de la fauna a través del paisaje para suplir sus necesidades biológicas; por ello, no recomendamos el uso de barreras que restrinjan el acceso a las carreteras sin que haya alternativas para cruzarlas. Las acciones más apropiadas para las especies de amplio rango o amenazadas son las que modifican el comportamiento de la fauna para guiar su desplazamiento usando barreras (como vallas que separan a los animales del tránsito) para que lleguen a cruces sobre o debajo de las carreteras. Las recomendaciones sobre estas medidas para el tránsito seguro de los jaguares se detallan en las siguientes secciones.

Recomendaciones para Guiar los Jaguares de Forma Segura Sobre o Bajo las Carreteras.

Las estructuras para el cruce de la fauna silvestre son una categoría relativamente nueva de la infraestructura del transporte que permite que la fauna cruce de manera segura, conectando así los hábitats y las poblaciones silvestres, reduciendo la mortalidad de los animales en las carreteras e incrementando la seguridad de los viandantes. Los diseños de cruces para fauna silvestre precisan de una profunda investigación sobre el comportamiento de cada especie que pueda influir en la efectividad de los cruces. El uso de la fauna de las infraestructuras para cruzar depende de varios factores, incluyendo la ubicación en el paisaje, la distancia entre los cruces y las dimensiones de éstos, el hábitat que rodea la infraestructura, presencia o ausencia de cobertura vegetal, tipo de sustrato, luz, humedad, temperatura, accesos, vallas que guían el tránsito de la fauna, presencia de gente y ruido asociado a ésta, preferencias de cada especie, y el tiempo que pasa entre que se construye el cruce y que los animales aprenden a usarlo (Foster y Humphrey 1995, Clevenger y Waltho 2000, Jackson y Griffin 2000, Clevenger et al. 2002, Mata et al. 2005, Huijser et al. 2007). Se debe considerar estos temas dentro de la logística del proyecto, que incluyen costos de la infraestructura, disponibilidad de materiales y capacidad técnica, limitaciones físicas del lugar (ej. suelo, terreno, hidrología); más aún, antes de iniciar la construcción es importante coordinar con los gestores de uso de suelo y de transporte.

Las preferencias de cada tipo de especie son factores importantes para el diseño de infraestructuras de cruce de fauna (Clevenger et al. 2002, Iuell et al. 2003, Hardy et al. 2007). Nuestras recomendaciones incorporan experiencias de otros proyectos que consideran ubicación, diseño y construcción de cruces. Las especificaciones sobre tamaño, diseño, planificación, ubicación, construcción y uso de los cruces para varias especies de ungulados se encuentra bien documentadas (e.g., Dodd et al. 2007, Dodd and Gagnon 2010). Recomendamos incorporar las especificaciones de diseños para ungulados en proyectos de corredores en la NRU para reducir la mortalidad asociada a las carreteras y para aumentar la conectividad para las presas de los jaguares. Sin embargo, la información sobre la eficiencia de los cruces es muy limitada para carnívoros y sobre todo para jaguares. Por ello presentamos recomendaciones para la planificación, diseño, ubicación y construcción de infraestructuras de cruce para jaguares basadas en datos de carnívoros afines, particularmente del puma, asumiendo que los pumas y los jaguares responden a las carreteras y a los cruces de manera similar.

En general, las infraestructuras para cruce de jaguares deben ser pasos elevados o subterráneos grandes con [vallas](#) que ayuden a guiar a los jaguares hacia estos cruces y [jump-outs](#) (rampas de tierra que permiten desplazarse fuera del área con vallas en carretera si los animales entran a la carretera y quedan atrapados entre las vallas). No recomendamos las [estructuras multi-uso](#), diseñadas para ser usadas tanto por gente como por fauna, para el cruce de jaguares. En áreas donde no se puede excluir la presencia humana, se debe considerar el excluir vehículos, minimizar el daño a la vegetación, educar a la gente, y sugerir que no se usen las estructuras durante la noche cuando los jaguares y ungulados están más activos (Paul Beier, Northern Arizona University, comunicación personal). Clevenger y Huijser (2011) presentaron estas

recomendaciones para los pumas basados en datos de 10 años de monitoreo e investigación de estructuras de cruce en Norte América. Específicamente, los pumas en el Parque Nacional Banff utilizaron una variedad de cruces, incluyendo pasos elevados, [túneles de gran envergadura](#), [alcantarillas ovales](#) de 7 m de ancho por 4 m de alto, y [alcantarillas cuadradas](#) de 2,5 m de ancho por 3 m de alto (Clevenger et al. 2002, Forman et al. 2003).

Las estructuras de cruce para jaguares deben ubicarse lejos de cualquier actividad humana y con suficiente cobertura como para guiar a los animales. Gloyne y Clevenger (2001) y Clevenger et al. (2002) concluyeron que los pumas en el Parque Nacional Banff prefirieron los túneles con estas características. Las estructuras de cruce para carnívoros deben construirse para proporcionar una vista clara del paisaje al otro lado de la estructura (Beier 1995, Foster y Humphrey 1995, Forman et al. 2003, Ruediger 2007). Se debe evitar que haya luces artificiales y otro tipo de construcciones cerca de la estructuras de cruce. Beier (1995), Jackson (1999), y Cramer y Bissonette (2005) descubrieron que las luces artificiales desalentaban los pumas de usar los cruces.

Pasos Elevados

Los pasos elevados para la fauna silvestre incluyen todos los pasos que cruzan las carreteras por encima del nivel del tránsito y son típicamente fabricadas por la gente, e incluyen [puentes que son parte del paisaje](#) o segmentos de la carretera que forma un túnel para pasar por debajo del suelo (Forman et al. 2003, Iuell et al. 2003, Huijser et al. 2007, Clevenger y Ford 2010, Clevenger y Huijser 2011). Los puentes diseñados como cruces de fauna son idealmente más cortos y más anchos que los puentes convencionales para vehículos que tienen dos o cuatro carriles. Los cruces para fauna que están bien diseñados tienen una buena capa de tierra y vegetación, que emula las condiciones del hábitat circundante. Los pasos elevados deben ser útiles para el desplazamiento de una gran variedad de especies, desde mamíferos mayores hasta invertebrados, con características de diseño y elementos del hábitat que proporcionen un sustrato y una cobertura apropiada en todo el cruce. Los cruces de fauna más efectivos son los que están lejos de las actividades humanas ya que éstas pueden desalentar a los animales a cruzar por el paso (Clevenger y Ford 2010). El uso por parte de la gente de los cruces de fauna debe ser nulo o limitado a un sendero pedestre, que está inhabilitado de noche y no se debe permitir que la gente se quede en la zona, ni acampe en un área de 400 m del cruce (Paul Beier, Northern Arizona University, comunicación personal). Los pasos elevados pueden ser muy costosos, pero son medios efectivos para minimizar, al menos localmente, los efectos de la fragmentación de los animales terrestres por causa de las carreteras (Iuell et al. 2003) cuando están ubicados, diseñados y administrados apropiadamente y tienen vallas que guían a los animales a los cruces mientras restringen el acceso de los mismos a las carreteras.

Los pasos elevados para jaguares deben ser similares a los diseñados para otros mamíferos mayores (Iuell et al. 2003, Clevenger y Ford 2010), que generalmente tienen 50 a 70 m de ancho, y hasta 100 metros de largo dependiendo de las logísticas del proyecto. La mayor parte de los

pasos elevados en Europa tienen 90 m de ancho en los extremos y 70 m en la parte media (Jackson y Griffin 2000, Clevenger et al. 2002). Seguimos las recomendaciones de Iuell et al. (2003) y de Clevenger y Huijser (2011) que mientras más ancho sea un paso elevado, será utilizado por una mayor cantidad de especies. Además, el ancho de los pasos elevados debe incrementarse con el largo de la estructura. Iuell et al. (2003) sugieren que el ancho mínimo sea de 0,8 en la relación ancho-largo. El arco de un paso elevado puede limitar la visión de un herbívoro, sobre todo cuando tiene que estar alerta a predadores, sobre todo cuando ascienden por el paso; se ha sugerido que los animales se sentirán más seguros usando un paso elevado cuando el arco es más abierto ya que así perciben un riesgo de predación menor al tener una visión más amplia del paisaje cuando cruzan el paso (Clevenger et al. 2002, Donaldson 2005).

La vegetación del cruce debe estar diseñada para guiar y proporcionar cobertura para los jaguares e idealmente debería emular la vegetación circundante a fin de tener un hábitat idóneo (Iuell et al. 2003). El mantenimiento, las limitaciones de ingeniería (como el peso acumulado sobre el cruce), la seguridad del tránsito (ej. Prevenir que árboles del cruce se caigan sobre la carretera) son consideraciones importantes al seleccionar las especies de plantas nativas que se usarán en el cruce. Iuell et al. (2003) sugieren una profundidad del suelo de 0.3 m para pasturas y hierbas, de 0.6 m para arbustos y matorrales, y de 1.5 m para árboles. Además, los pasos elevados pueden tener en los bordes una berma de tierra que reduzca las luces y ruidos provenientes de la carretera, lo cual es preferido por algunas especies silvestres (Clevenger y Huijser 2011). Se precisa de más estudios sobre la tolerancia de la fauna hacia la luz y el ruido en las estructuras de cruce. Curiosamente, algunas especies como el alce (*Cervus elaphus*) prefieren cruzar los pasos elevados sobre estas bermas, probablemente para aumentar su visión del horizonte para detectar predadores. Generalmente, los pasos elevados son más tranquilos que los túneles ya que tienen un hábitat similar al paisaje circundante, y pueden ser usados por más especies que los túneles (Jackson y Griffin 2000, Iuell et al. 2003).

Pasos Subterráneos

Los pasos subterráneos para fauna silvestre son cruces construidos como una conexión por debajo del nivel del tránsito, que van desde [túneles amplios](#) hasta [alcantarillas de diámetro corto](#) (Iuell et al. 2003, Huijser et al. 2007, Clevenger y Ford 2010, Clevenger y Huijser 2011). Aunque están típicamente diseñados para el paso de vehículos por humedales o cañones profundos (o sea no para el desplazamiento de fauna silvestre), los [puentes amplios, viaductos, y calzadas](#) pueden ser cruces ideales para los jaguares y sus presas, particularmente para animales que prefieren desplazarse cerca del agua o por vegetación riparia. En situaciones donde una carretera cruza un valle u otra área por debajo del nivel de la infraestructura, un viaducto subterráneo es una alternativa ecológica en vez de instalar alcantarillas que ayuden a nivelar el agua (Iuell et al. 2003). Los viaductos y estructuras similares proporcionan una mejor vinculación entre hábitats y son más aptos para una gran cantidad de especies que otros tipos de pasos subterráneos (Iuell et al. 2003).

Gloyne y Clevenger (2001) monitorearon 22 estructuras de cruce a lo largo de 45 km de la carretera Trans-Canada en el Parque Nacional Banff durante todo el año entre 1996 y 2000. Encontraron que los pumas solían usar pasos subterráneos amplios más que otros tipos de estructuras. Este descubrimiento fue apoyado por la comparación con pasos subterráneos ubicados a 2 km (y por ende usados potencialmente por los mismos pumas), confirmando que estos pasos fueron los más utilizados. También reportaron una correlación positiva entre el paso de pumas por todos los tipos de estructuras de cruce (puentes, alcantarillas de metal y alcantarillas cuadradas de concreto) y los usados por el ciervo mulo (*Odocoileus hemionus*) y el venado cola blanca (*O. virginianus*). Gloyne y Clevenger (2001) también reportaron que los pumas usaron todo tipo de cruces (incluyendo subterráneos) más de lo esperado en los meses de invierno y menos de lo esperado durante el verano. Los autores sugirieron que este patrón estacional fue una función del desplazamiento estacional de los pumas en Bow Valley y que también fue observada en otros sitios (Logan e Irwin 1985, Jalkotzy y Ross 1993). Las estructuras de cruce para fauna (incluyendo los pasos subterráneos) que fueron más usadas por pumas en Banff fueron las que estaban ubicadas cerca de hábitat idóneo para pumas. Asumiendo algunas similitudes en el comportamiento respecto a caminos y cruces de fauna entre pumas de Banff y jaguares de la NRU, los resultados de Gloyne y Clevenger's (2001) presentan ideas para los diseños orientados a jaguares.

En situaciones donde la carretera está construida en terreno montañoso o en un terraplén sobre la topografía para mantener la pista llana, se pueden usar pasos subterráneos para que cruce la fauna silvestre. Aunque se ha mencionado que los pasos subterráneos son menos útiles para conectar hábitats debido a la falta de luz y agua que limita el crecimiento de la vegetación (Iuell et al. 2003), los pasos bien diseñados proporcionan oportunidades de circulación segura para la fauna; dependiendo del comportamiento de la especie y sus percepciones sobre el riesgo, los pasos subterráneos pueden ser más utilizados si la cobertura limitada de un paso elevado deja a los animales expuestos y vulnerables a la predación.

Las dimensiones de los pasos subterráneos para la fauna son su altura, ancho y longitud. La longitud de un paso subterráneo generalmente corresponde al ancho de la carretera más la distancia adicional para los ingresos en los extremos (dependiendo de la topografía y el diseño de ingeniería); sin embargo, el ancho y, en menor grado, la altura, pueden diseñarse de acuerdo a los requerimientos de cada especie (Iuell et al. 2003). Idealmente, los pasos subterráneos para la fauna no deben ser mayores a los 70 u 80 m en longitud, excepto en situaciones especiales, tales como carreteras de seis carriles o carreteras acompañadas de infraestructuras adicionales (como vías accesorias o líneas de ferrocarril; Clevenger y Huijser 2011). Clevenger y Huijser (2011) recomiendan combinar los tamaños de los pasos (longitud, ancho, alto) con otros factores estructurales (ej. carreteras divididas vs. no divididas) y ambientales (ej. calidad del hábitat, especies objeto) cuando se diseñan los pasos subterráneos para fauna. Las recomendaciones generales sobre las medidas mínimas de pasos subterráneos varían entre especies. Las recomendaciones generales para múltiples especies son pasos de al menos 7 metros,

preferiblemente >12 m de ancho y al menos 4 metros de alto (Iuell et al. 2003, Clevenger y Huijser 2011). Estas especificaciones generales son basadas en el patrón de uso de los ungulados y permitirían el paso de carnívoros que también usan estructuras más pequeñas (ej. Beier 1995, Clevenger y Huijser 2011).

Las dimensiones de un paso subterráneo se estandarizan como la apertura relativa (también conocida como su “proporción de apertura”) y medidas multiplicando su ancho por su altura y dividiéndolos entre la longitud del cruce (ancho x alto / longitud) (Reed y Ward 1985, Gordon y Anderson 2003, Iuell et al. 2003, Servheen y Lawrence 2003). Por ejemplo, un paso subterráneo con un ancho de 12 m, una altura de 4 m y una longitud de 25 tendría un índice relativo de apertura de 1,9. Sin embargo, siguiendo las recomendaciones de Clevenger y Huijser (2011), no recomendamos el uso del índice de apertura en la planificación y diseño de las estructuras de cruce de fauna debido a que la relación entre la apertura y el uso de cruce puede ser diferente para cada especie y también dependiente del tiempo y de las variaciones en cómo se mide la apertura (ej. como un índice, una relación, o simplemente un postulado o concepto); no se recomienda para la mayor parte de los casos un diseño basado en el índice “mínimo”.

En muchos paisajes, las grandes distancias recorridas por los carnívoros están asociadas al agua o hábitats ribereños (Noss 1991, Hilty et al. 2006); esto es particularmente cierto para las regiones xéricas tales como la zona norte de la NRU (Atwood et al. 2011). Por ello, los lugares donde los jaguares probablemente se estén desplazando están asociados con el agua y por lo tanto ya tienen puentes en las zonas ribereñas. Además, debido a que estos sitios de paso de los jaguares están asociados al agua, cualquier paso subterráneo construido para el cruce de fauna silvestre, tendrá un doble propósito: también servirá para mantener y nivelar el paso del agua.

[Los pasos subterráneos con doble propósito](#) están diseñados para dejar pasar el agua y la fauna Silvestre (Clevenger y Ford 2010:40, [Clevenger y Huijser 2011:139](#)). Debido a estar asociados con hábitats ribereños, generalmente se construyen ubicados en corredores de muchas especies silvestres. Se ha demostrado que estos pasos subterráneos son usados por varias especies de mamíferos mayores, y su uso dependerá de cómo la estructura está adaptada a los requerimientos de desplazamiento de cada especie. Según Clevenger y Ford (2010), para este tipo de pasos subterráneos, es importante incluir caminos cerca al agua que sean por lo menos de tres metros de ancho y que tengan un espacio libre vertical de cuatro metros. Es importante que estos caminos estén ubicados en zonas de manera que puedan ser transitables incluso en períodos de llenura. Sin embargo, algunas estructuras pequeñas pueden tener caminos de al menos 2 m de ancho y 3 m de espacio libre vertical (ver Clevenger y Ford 2010). Por ejemplo, Beier (1995) registró pumas dispersándose en la costa sur de California que cruzaban regularmente puentes debajo de carreteras destinados a nivelar el agua. Sin embargo, los animales dispersándose observados en ese estudio generalmente evitaban las alcantarillas grandes o chicas debajo de autopistas o caminos de dos carriles cuando no había vallas que evitaran el ingreso a la carretera y que guiaran a los animales a las alcantarillas. Las vallas para guiar a los animales silvestres probablemente incrementaron el uso de las alcantarillas por parte de los pumas (Paul Beier,

Northern Arizona University, comunicación personal). Un puma macho, sin embargo, usó frecuentemente una alcantarilla cuadrada de 1,8 m para cruzar bajo una autopista de ocho carriles.

Vallas

El uso de vallas es un medio efectivo para reducir los accidentes entre vehículos y fauna; sin embargo, sin estructuras de cruce bajo o sobre las carreteras, este sistema incrementa la fragmentación del hábitat y reduce la permeabilidad del paisaje. Las vallas son consideradas una medida de mitigación para la fragmentación y la conectividad del hábitat sólo si están en combinación con las estructuras de cruce de fauna que compensan efectivamente el negativo efecto-barrera de las vallas guiando el desplazamiento de la fauna (Iuell et al. 2003, Jaeger y Fahrig 2004, Clevenger y Huijser 2011). La eficiencia de los pasos elevados y subterráneos para reducir los accidentes entre vehículos y fauna y facilitar la conectividad dependen seriamente de las vallas que evitan que los animales ingresen al autopista y los guía hacia las estructuras de cruce (Clevenger et al. 2002, Iuell et al. 2003).

Es preciso que las [vallas de exclusión](#) sean diseñadas para guiar a los jaguares y sus presas hacia las estructuras de cruce mientras se evita que puedan saltarlas, treparlas, cavar bajo ellas o empujarlas hacia la carretera. Clevenger y Huijser (2011) sugieren que el diseño de las vallas destinadas a mitigar los accidentes con el tránsito depende de varias variables asociadas con la ubicación específica, el uso del suelo en las zonas cercanas, el volumen del tráfico, y la necesidad potencial de agregar caminos accesorios. Las vallas tienen que estar en ambos lados del camino y su parte final tiene que ser simétrica, no escalonada o repentina. Las vallas continuas están asociadas a con largos tramos de tierras públicas con pocas o ningunas propiedades privadas. Tramos largos de vallas continuas con pocos cortes reducen el problema de guiar el movimiento de la fauna con varias vallas y cuando otros caminos ingresan a la carretera que está cercada. Las vallas parciales o discontinuas son más comunes en áreas con uso de suelo mixto (público y privado). Esta estrategia generalmente tiene gran aceptación, pero precisa de medidas adicionales tales como modificaciones de corrales para el ganado en las partes sin vallas que tienen que ser monitoreados para evitar que la fauna cruce estas partes abiertas de las vallas e ingrese a la carretera ([ver Clevenger y Huijser 2011:170-173](#)).

El material de las vallas debe ser alambre tejido o cercos metálicos galvanizados. [Clevenger y Huijser \(2011:173-174\)](#) presentan una serie de especificaciones para el diseño de las vallas. El material de las vallas debe ajustarse a la parte de atrás (no el lado que da a la pista) de los postes, de manera que el impacto de los vehículos que salgan de la pista solo derriban la cerca y no los postes; esto también reduce la seriedad del daño a los vehículos y pasajeros debido a la valla puede ceder más fácilmente. Las vallas de 2,2 a 2,4 m de alto evitan que los venados las salten (Ward 1982, Iuell et al. 2003, D'Angelo et al. 2005, Clevenger y Huijser 2011). Mallas más pequeñas, postes de metal (en vez de madera) y extensiones de la malla (de 90 grados en la parte superior de la valla) ayudan a prevenir que los osos (*Ursus* spp.) y los pumas trepen las vallas

(Clevenger et al. 2001, Hardy et al. 2007, Clevenger y Huijser 2011). Enterrando la parte inferior de la valla aproximadamente un metro (menudo llamada falda enterrada) puede evitar que los animales cavén para pasar debajo de la valla (Woods 1990, Clevenger et al. 2001, Clevenger y Huijser 2011).

Ocasionalmente los animales cruzan las vallas (sin importar cuán buen diseño tengan) quedan atrapados en la carretera entre dos cercas creando situaciones de peligro, tanto para los vehículos como para el animal mismo (D'Angelo et al. 2005). Los animales capaces de trepar vallas (como osos, pumas o jaguares) probablemente saldrán de la carretera de la misma forma (Hardy et al. 2007). Las presas de los jaguares, principalmente ungulados, necesitan de elementos que les ayuden a salir de la carretera. Las compuertas de una sola vía permiten que los animales puedan salir; sin embargo, su efectividad se ve limitada por la reticencia de algunas especies a usarlas, algunas otras aprenden a usarlas para ingresar a la carretera y la falta de mantenimiento o de personal que abra estas puertas cuando un animal queda atrapado (Woods 1990, Hardy et al. 2007). Alternativamente, las rampas para saltar, que están hechas de tierra y que salen del borde de la carretera hacia la valla, permiten a los animales subir y saltar fuera de la carretera a la vez que no dejan que la fauna pueda usarlas para ingresar (Waters 1988, Bissonette y Hammer 2000). Sectores con cercas perpendiculares en las rampas para saltar pueden guiar a los animales a salir mientras caminan al borde de la valla. Una consideración que precisa de mayor investigación es si las rampas para saltar permiten a los jaguares ingresar a las carreteras.

Los animales ingresan a carreteras cercadas con mayor frecuencia al final de las vallas (Ward 1982, Waters 1988, Woods 1990, Foster y Humphrey 1995, Clevenger et al. 2001). Clevenger y Huijser (2011) sugieren que el final de las vallas debe haber una estructura de cruce. Si no se puede instalar un cruce al final de la valla, entonces ésta debería terminar en zonas con el hábitat menos idóneo para el paso de la fauna, tales como escarpados (Clevenger y Huijser 2011). Además, las vallas deberían terminar en áreas con una buena visibilidad para los conductores, zonas con velocidad vehicular reducida y carteles alertando a los conductores de presencia potencial de fauna. Las medidas diseñadas para limitar el acceso a las carreteras al final de las vallas incluyen presencia de guardias de ganado o fauna, vallas eléctricas, y suelos pedregosos que evitan el paso de los ungulados (Clevenger et al. 2001, Hardy et al. 2007, [Clevenger y Huijser 2011:170-173](#)).

Las vallas no son estructuras permanentes y son susceptibles de deteriorarse o ser destruidas por accidentes vehiculares, caída de árboles, erosión del suelo, excavaciones de animales, inundaciones y vandalismo (Clevenger y Huijser 2011). Sugerimos revisar las vallas al menos cada 6 meses caminando al borde de toda la valla para identificar los daños y repararlos; por esto, los costos de monitorear y reparar las vallas debe ser incluido en el presupuesto como un gasto anual recurrente.

Finalmente, las vallas pueden ser difíciles de ver para algunas especies, y sobre todo cuando quedan atrapados entre las cercas, entran en pánico y comienzan a golpearse repetidamente

contra éstas intentando escapar, particularmente cuando el animal se encuentra frente a una valla por primera vez (Anthony Clevenger, Western Transportation Institute, comunicación personal). Podría ser necesario incrementar la visibilidad de las vallas con algún tipo de material en zonas donde esto esté sucediendo.

Distancia Entre las Estructuras

La distancia entre los cruces para fauna silvestre en una carretera dependerá mayormente de la variabilidad del paisaje, del terreno, densidad poblacional, el solapamiento del hábitat de la fauna con la carretera y las características de la dispersión que contribuyen a los requerimientos de conectividad de varias especies (Clevenger y Huijser 2011). En paisajes que están fuertemente fragmentados con poco hábitat natural cerca de las carreteras generalmente hay pocas oportunidades para construir cruces para la fauna comparados con paisajes poco fragmentados. Las distancias entre las estructuras dependerán de las características del hábitat que faciliten los movimientos de los jaguares y sus presas, del uso del suelo y las actividades de manejo en las cercanías de las estructuras (Clevenger y Huijser 2011). Clevenger y Huijser (2011) resumieron varios proyectos de mitigación a gran escala, existentes o proyectados, en Norte América, y encontraron que las estructuras de cruce, si bien están a distancias variables, están separadas por un promedio de 1,8 km (rango: 1,5 – 6,0 km).

La ubicación específica de una estructura de cruce para la fauna silvestre es tan importante como su diseño (Clevenger y Huijser 2011). Existen proyectos que han incluido estructuras de cruce a intervalos regulares (e.g., Fase 1 de los Cruces de Fauna Silvestre en Banff) pero este sistema ha sido considerado poco práctico comparado con las estructuras construidas a distancia variables tomando en cuenta el hábitat, paisaje, uso de suelo y corredores para el desplazamiento de la fauna. Existe varios métodos, incluyendo los corredores de menor costo, las funciones de selección de recursos, la teoría de circuitos, y los puentes Brownianos, usados para determinar los sitios clave donde se juntan hábitats importantes para la fauna y carreteras (Matthews et al. 2014). Estos métodos ayudan a los ecologistas, ingenieros, y especialistas en el transporte a construir cruces aptos para la fauna silvestre en ubicaciones óptimas a lo largo de las carreteras.

Monitoreo y Evaluación

El monitoreo de la fauna Silvestre antes y después de la construcción es un elemento clave en la selección de estructuras de cruce óptimas y la evaluación de su éxito. El monitoreo va desde una simple evaluación de los jaguares en el corredor de la carretera hasta procesos ecológicos complejos y funciones de los paisajes de importancia para la conservación. El monitoreo pre-construcción puede proporcionar datos importantes para justificar la ubicación específica de una estructura de cruce; simultáneamente, o en conjunto, el monitoreo pre-construcción puede establecer una línea base de la cual se pueden detectar los cambios post-construcción para determinar la efectividad de las acciones. No es difícil estimar los cambios en las tasas de accidentes entre animales y vehículos, pero hay mucho otros procesos ecológicos que también

pueden ser estimados antes y después de implementar las medidas de mitigación para determinar el efecto de estas acciones. Idealmente, el monitoreo y la investigación deben abordar en conjunto los accidentes entre vehículos y fauna y los procesos ecológicos (Hardy et al. 2007). [Clevenger y Huijser \(2011:67\)](#) presentaron cinco funciones ecológicas que incluyen tres niveles de organización biológica (genes, especies/población, comunidad/ecosistema) que deben cumplir las estructuras de cruce:

- 1) Reducir la mortalidad e incrementar el movimiento (intercambio genético) entre las poblaciones;
- 2) Cumplir con los requerimientos biológicos tales como alimento, cobertura y búsqueda de pareja;
- 3) Dispersión del área natal o maternal y recolonización luego de ausencias largas;
- 4) Redistribución de las poblaciones en respuesta a cambios ambientales y a perturbaciones naturales (ej. fuego, sequía); desplazamientos o migración en años de baja reproducción o supervivencia; y
- 5) Mantenimiento a largo plazo de las metapoblaciones, estabilidad de la comunidad, y de los procesos del ecosistema.

Estas funciones se incrementan en complejidad, costos y tiempo requerido para un monitoreo apropiado de la efectividad. De acuerdo a estas funciones, [Clevenger y Huijser \(2011:70–71\)](#) describieron un marco teórico que puede usarse para formular cuestionamientos de manejo, seleccionar metodologías, y diseñar estudios para evaluar la efectividad de los cruces de fauna a fin de mitigar los accidentes en las carreteras. De forma general este marco incluye:

- 1) Establecer metas y objetivos;
- 2) Establecer las condiciones de la línea base;
- 3) Identificar los cuestionamientos específicos de manejo que serán respondidos por el monitoreo;
- 4) Seleccionar los indicadores;
- 5) Identificar áreas de experimento y control;
- 6) Diseñar e implementar un plan de monitoreo; y
- 7) Validar las relaciones entre los indicadores y los puntos de referencia.

Una vez que las metas y objetivos estén definidos, los parámetros de interés llevarán a la selección de métodos para la obtención de datos relevantes. Hay una serie de métodos de investigación para monitorear la fauna silvestre y la efectividad de los cruces. Los métodos van desde relativamente simples (como los reportes de accidentes con fauna proporcionados por la Secretaría de Transporte o una agencia afín) hasta complejos (como la captura de animales y seguimiento con sistemas de geoposicionamiento global [GPS]). [Clevenger y Huijser \(2011:Anexo E\)](#) describieron varios métodos que pueden ser usados para lograr una serie de objetivos de monitoreo, incluyendo consideraciones sobre especies focales, temporadas, costos y ubicación.

Si los datos específicos sobre cambios en los parámetros de interés se usan para definir la efectividad (ej. las estructuras de cruce se consideran como “efectivas” si los accidentes vehículos-fauna se reducen en un 50%), se debería aplicar una prueba estadística para asegurarse que ese cambio sea detectado ([Hardy et al. 2006:60](#), [Craighead et al. 2011:6](#)). Cambios muy pequeños pueden no ser detectados debido a la variabilidad inherente en los datos y en el esfuerzo de muestreo. Los datos previos a la construcción se pueden usar para estimar la variabilidad que se precisa para un análisis de poder; estos análisis pueden también determinar un esfuerzo de muestreo apropiado (intensidad y duración del muestreo) que se precisa para detectar algún cambio (o, viceversa, se puede usar un análisis de poder para determinar cuál es el umbral de detección y por ende cuales definiciones de éxito son realistas de esperar o anticipar).

Datos de Accidentes Fauna-Vehículos

La colecta de datos sobre accidentes entre fauna y vehículos de la Secretaría de Transporte (o una agencia afín) y del personal de vigilancia es una metodología de monitoreo común (Clevenger et al. 2002, Knapp et al. 2004, Hardy et al. 2007, Clevenger y Huijser 2011). Estos datos pueden usarse para calcular las tasas de accidentes entre vehículos y fauna antes y después de la construcción y evaluar la efectividad de las vallas para animales. Los accidentes entre vehículos y jaguares en la NRU son eventos muy raros, estos datos tienen una aplicación limitada a nivel de especie. Sin embargo, estos datos pueden ser valiosos para reducir las tasas de coaliciones y enfocarse en los procesos ecológicos de las presas de los jaguares. Los datos sobre animales atropellados suelen tomarse durante trabajos cotidianos llevados a cabo por el personal de transporte, del cual se pueden obtener datos de diversas especies y es una metodología de bajo costo. Sin embargo, este método de monitoreo requiere esfuerzos de muestreo consistentes tanto espaciales como temporales, para que los datos sean válidos y útiles para el análisis. Hardy et al. (2007) presentan las siguientes consideraciones cuando se solicitan, recopilan, analizan y aplican los resultados de las bases de datos sobre accidentes entre vehículos y fauna:

- 1) Datos del muestreo: quién tomó los datos y cómo fueron colectados;
- 2) Propósito del muestreo: cuál fue el objetivo de coleccionar datos de accidentes entre fauna y vehículos

- 3) Esfuerzo de muestreo: los reportes de accidentes entre fauna y vehículos fueron colectados de forma sistemática o a través de registros ocasionales.
- 4) Fuentes de error: hasta qué grado la base de datos se ve afectada por un sub-muestreo, por errores espaciales, o por sesgo o fatiga por parte del observador;
- 5) Otros parámetros: que información secundaria fue registrada en cada reporte de accidente entre fauna y vehículos; y
- 6) Combinación de bases de datos sobre accidentes entre vehículos y fauna: cómo las diferencias entre las áreas de muestreo, períodos, o métodos afectan las bases de datos combinadas y si es posible detectar y reducir observaciones duplicadas.

Los accidentes fauna-vehículos a menudo son documentados incidentalmente o de manera oportunista, resultando en una base de datos inconsistente que sub-representa los accidentes. Los muestreos sistemáticos pueden reducir, pero no necesariamente eliminar, la subrepresentación de datos tomados de manera oportunista. El monitoreo sistemático y rutinario aún puede subestimar los accidentes 12 a 16 veces o más para algunas especies (Slater 2002). Las fuentes de error y las variaciones en el muestreo también afectan las bases de datos de accidentes y atropellos (Hardy et al. 2007). Las fuentes de error incluyen la desaparición del cadáver (ej. los cadáveres pueden ser consumidos por carroñeros o sacados de la pista antes de ser registrados) o que los animales mueran lejos de la carretera donde no puedan ser detectados (Slater 2002, Sielecki 2004). Las fuentes de error en el muestreo incluyen la no detección de algún cadáver, fatiga o sesgo por parte del observador, errores en el reporte y entrenamiento insuficiente (Clevenger et al. 2002). También es necesario cierto grado de exactitud espacial de los atropellos de animales para un programa de monitoreo y mitigación efectivo (Clevenger et al. 2002). Clevenger y Huijser (2011) estimaron costos asociados bajos que consisten en capacitar al equipo de mantenimiento de la secretaría de transporte o su entidad equivalente, y realizar talleres de actualización y reuniones con el personal para alentar la colecta de datos.

Estas consideraciones limitan el uso de los datos de accidentes vehículos-fauna en varios aspectos, sin embargo, una cuidadosa evaluación, selección, análisis e interpretación de los resultados usando tales datos puede proporcionar datos sobre las áreas donde más se registran estos accidentes para realizar un estudio específico para determinar cómo las medidas de mitigación pueden reducir las tasas de accidentes.

Parcelas de Huellas

Las huellas de mamíferos se usan para confirmar su presencia, además de documentar sus movimientos para apoyar datos sobre medidas de mitigación, y potencialmente, tendencias poblacionales (Clevenger y Waltho 2000, Clevenger et al. 2002, Ng et al. 2004, Long et al. 2008). Las parcelas de huellas se instalan con diversos materiales (ej. con el sustrato disponible en el suelo, agregando arena, una mezcla de arena y limo o polvo de mármol) que es depositado

en una parcela lineal (por lo general de 2 metros de ancho) en la entrada de una alcantarilla o dentro de la misma (Scheick y Jones 1999, Singleton y Lehmkuhl 1999, van Manen et al. 2001, Ng et al. 2004, Mata et al. 2005, Hardy et al. 2007, Clevenger y Huijser 2011). Las parcelas de huellas dentro de las alcantarillas o debajo de las estructuras de cruce protegen las huellas de ser borradas por el viento o la lluvia, obteniendo datos confiables cuando son revisadas y barridas cada 3 – 4 días (Clevenger y Waltho 2000, Clevenger y Huijser 2011). Dependiendo de la disponibilidad de medios para estudiar huellas, esta técnica es de bajo costo y no precisa mayor tecnología, aunque el reconocimiento y registro de las huellas requiere de personal capacitado. Clevenger y Huijser (2011) estimaron costos de personal en 1.300 \$US para un mes de monitoreo con 10 días de trabajo por mes a 130 \$US/día (16\$US/hora) y pocos gastos en equipo (rastrillo, asistente personal, cámara digital, cinta métrica, guía de campo sobre huellas de animales).

Monitoreo Fotográfico y con Video

Las trampas cámaras activadas por calor en movimiento registran fotos de la fauna, con las que se obtiene datos de ocurrencia (Long et al. 2008). Las cámaras pueden programarse para tomar fotos de animales cerca o que están en el cruce, circulando por un camino, o en áreas mayores que están siendo monitoreadas. Las cámaras permiten una identificación precisa de la especie, con poco trabajo, además pueden instalarse en cualquier época del año, registran animales de forma permanente y se obtienen fotos para la difusión. Una ventaja de las trampas cámara sobre los estudios con huellas es que los jaguares pueden ser identificados individualmente, cosa que permite realizar análisis más detallados (Maffei et al. 2011, Polisar et al. 2014). El monitoreo con video nos da mayores luces sobre el comportamiento animal, incluyendo intentos fallidos de cruzar las estructuras o velocidad del animal cruzando. Entre las desventajas se encuentran los altos costos iniciales y el riesgo de robos. Clevenger y Huijser (2011) estimaron un alto costo inicial (550 – 800 \$US por cámara, incluyendo la caja de protección antirrobo, tarjetas de memoria y baterías). Los costos operativos son bajos para los estudios realizados en las mismas estructuras de cruce, pero aumentan a medida que el área de muestreo se incrementa.

Radio-Telemetría de los Movimientos de la Fauna Silvestre

Los estudios de radio telemetría (de frecuencia muy alta [VHF] o con sistemas de posicionamiento global [GPS]) proporcionan datos comparativos sobre los movimientos de los animales respecto a los caminos, las vallas para fauna y las estructuras de cruce (Chruszcz et al. 2003). Los jaguares pueden ser rastreados durante años antes y después de la construcción del cruce (Dodd et al. 2003). Estas tecnologías dan datos sobre el comportamiento, la mortalidad y parámetros demográficos de la población, siempre que el tamaño de muestra sea grande. A través de la radio telemetría se puede confirmar certeramente que los animales han cruzado exitosamente una carretera. Sin embargo, dependiendo del intervalo de muestreo, a veces es difícil confirmar si los individuos rastreados están usando o no la estructura para cruzar la carretera. Algunas tecnologías de GPS que registran posiciones a lapsos cortos pueden resolver

este cuestionamiento. Los costos de realizar un estudio de radio telemetría, incluyendo gastos logísticos, coordinación, compra del equipo, y captura y manejo de los animales, son altos comparado con otros métodos.

Resumen de Monitoreo y Evaluación

La evaluación ideal sobre el desempeño de las estructuras de cruce debe incluir la colecta de datos antes y después de ejecutar el programa de mitigación (Hardy et al. 2007). La colecta de datos antes de la mitigación debe empezar lo más pronto posible para maximizar el muestreo antes de la construcción minimizar los efectos estocásticos ambientales y demográficos. Lapsos cortos de muestreo de ≤ 2 años pueden dar resultados sesgados y llevar a conclusiones erróneas y tomar decisiones mal orientadas (Clevenger et al. 2002). De forma similar, llevar a cabo un monitoreo inmediato luego de la construcción puede dar resultados sesgados debido a que los animales necesitan de un tiempo de adaptación antes de usar los cruces (Clevenger et al. 2002). Conocer los efectos a largo plazo sobre el paisaje de las estructuras de cruce en términos de comunidades, biodiversidad, procesos ecosistémicos y ecología del paisaje puede llegar a tomar más de 10 años antes de sugerir resultados (Clevenger et al. 2002, Hardy et al. 2007), especialmente para especies longevas, de reproducción lenta y que tienen densidades poblacionales bajas, tales como los jaguares en la NRU.

Costos

La construcción de estructuras de cruce para mitigar los efectos de las carreteras con el fin de conservar la fauna silvestre y por seguridad pública es más económica durante la construcción de carreteras y de proyectos de ampliación (Clevenger and Huijser 2011). Así, los fondos para la construcción de cruces es más probable que provengan de proyectos viales que se encargan de varios problemas de transporte, uno de los cuales puede ser reducir los accidentes de vehículos con animales y proporcionar a la fauna un paso seguro a través de las carreteras. Este tipo de proyectos debe combinarse con un análisis de las prioridades de gestión del transporte en un área mucho más grande que los proyectos específicos (Clevenger y Huijser 2011, Matthews et al. 2014). Los socios de este análisis para la NRU deben incluir a U.S. Federal Highway Administration, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México, secretarías de transporte federal y estatal, de recursos naturales, y las agencias regionales de planificación, junto con varias comunidades locales de Estados Unidos y México. Más que construir una estructura de cruce específica en un proyecto en particular, se deben identificar tramos carreteros que precisan de mitigación a una escala de paisaje y que ayuden a identificar el tipo de mitigación apropiado de acuerdo a los objetivos generales y a los recursos disponibles.

No existe información sobre la fauna que cruza las estructuras en toda la NRU. No pudimos encontrar ejemplos estructuras de cruce de fauna diseñadas y construidas en México; por lo tanto, no pudimos desarrollar presupuestos para diferentes tipos de estructuras y proyectos en México. Sin embargo, en Arizona, biólogos, ingenieros y administradores de 9 agencias públicas

han identificado áreas grandes de hábitat silvestre protegido, además de corredores potenciales para la fauna entre ellas, los factores que podrían afectar estas zonas y las oportunidades de conservación (The Arizona Wildlife Linkages Workgroup 2006). El Arizona Wildlife Linkage Assessment es un esfuerzo inicial para identificar zonas potenciales que son importantes para la conexión de la fauna y los ecosistemas naturales de Arizona. Este esfuerzo sirve como una fuente de información para los planificadores e ingenieros, dando sugerencias para la incorporación de medidas que protejan estas zonas dentro de su plan de manejo para enfocarse en la conectividad de la fauna así como la seguridad de los conductores.

Dos proyectos actuales en el sur de Arizona, Arizona State Route (SR) 77 a lo largo de la conexión Santa Catalina – Tortolita, y Arizona SR 86 a lo largo de la conexión Kitt Peak, ofrecen ejemplos de una planificación efectiva a nivel de proyecto y de sistema con una estimación de costos para el diseño y la construcción de estructuras de cruce de fauna.

Ruta 77 del Estado de Arizona: Conexión Santa Catalina – Tortolita

El Departamento de Transporte de Arizona (Arizona Department of Transportation [ADOT]) y el Departamento de Caza y Pesca de Arizona (Arizona Game and Fish Department) están trabajando en colaboración para incrementar la permeabilidad del SR 77 para la fauna silvestre y para mantener la conectividad del hábitat instalando estructuras de cruce para la fauna silvestre como parte del Proyecto de Ampliación Vial Tangerine de la SR 77 en el Condado Pinal ([Arizona Department of Transportation 2009](#)). La carretera SR 77 atraviesa gran parte de Arizona, desde su parte norte, en el límite de la Nación Navajo al norte de Holbrook hasta su unión con la Interestatal 10 en Tucson. La carretera se divide en el área entre las Montañas Santa Catalina y las Montañas Tortolita, zona conocida como la conexión Santa Catalina – Tortolita, un área crítica para el desplazamiento de la fauna silvestre (The Arizona Wildlife Linkages Workgroup 2006). Las mejoras del proyecto incluyen ampliar la SR 77 de 4 a 6 carriles e incrementar el tránsito y el ancho de las cunetas. Las consideraciones del diseño para los cruces estuvieron basadas en las estructuras construidas en el Parque Nacional Banff a lo largo de la autopista Trans-Canada (Ford et al. 2010, McGuire 2012).

La propuesta original presupuestaba 8'230.000 \$US para construir 2 pasos subterráneos, un paso elevado, vallas, rampas de escape y costos asociados al diseño y la ingeniería ([Arizona Department of Transportation 2009:17-19](#)). El primero paso subterráneo para la fauna medirá 3,7 m de altura, 9,8 m de ancho y 57,9 m de largo, con un costo final de 615.790 \$US ([Arizona Department of Transportation 2009:10](#)). El segundo paso subterráneo tendrá 3,7 m de alto, 15,2 m de ancho y 57,9 m de largo, con un costo final de 729.680 \$US ([Arizona Department of Transportation 2009:10-11](#)). El paso elevado propuesto medirá 6,1 m de alto, 45,7 m de ancho y 57,9 m de largo compuesto de secciones de hormigón armado, con un costo final de 2'622.500 \$US ([Arizona Department of Transportation 2009:12-13](#)). Las obras de paisajismo, 9.711 m de vallas, y una rampa de escape tendrán un costo estimado de 100.000, 950.000 y 50.000 dólares respectivamente. El proyecto ha sido modificado para incluir dos estructuras de cruce, un paso

elevado y un paso subterráneo vinculados con vallas e integrados con 3 puentes largos ya existentes. Este proyecto fue iniciado en el verano de 2014 y se planea concluir en la primavera de 2016 ([Arizona Department of Transportation 2014](#)).

Ruta Estatal 86 en Arizona: Conexión Kitt Peak

ADOT (Arizona Department of Transportation) y la Nación Tohono O'odham están trabajando en colaboración para integrar las necesidades de conectar las poblaciones silvestres a la planificación del proyecto en marcha para los segmentos de la carretera SR 86. La carretera SR 86 conecta Tucson con la Nación Tohono O'odham y su gobierno tribal en Sells, Arizona (Tohono O'odham Nation [2011](#), [2014](#)). La carretera continúa hacia el oeste, conectando con la SR 85, Ajo, México, Gila Bend, y la Interestatal 8. La porción de la SR 86 entre el millaje 130 y 138 está identificado como Conexión Kitt Peak, uno de las 28 zonas prioritarias debido a su importancia para el venado mulo, el puerco de monte (*Tayassu tajacu*), puma, el musmón (*Ovis canadensis*) y el jaguar en una franja de norte a sur a lo largo de la cadena montañosa Baboquivari al oeste del Valle Altar desde México hasta la Interestatal 8 (Tohono O'odham Nation 2011, 2014). ADOT ha comenzado a ampliar la carretera existente de 2 carriles con cunetas angostas, para incluir cunetas de 2,4 m y vías auxiliares de 8,1 m para mejorar la seguridad de los viandantes (Tohono O'odham Nation 2011, 2014). Las vías auxiliares representan todo el costado asfaltado de la carretera, que empieza en el borde de la pista donde circulan los vehículos y para ser usado por vehículos que necesitan descansar o ser reparados.

Para enfocarse en la conectividad de la fauna a lo largo de la SR 86 en la Conexión Kitt Peak, la Nación Tohono O'odham está colaborando con el ADOT y la Autoridad Regional de Transporte del Condado de Pima (RTA) para instalar 4 estructuras de cruce para fauna silvestre (2 pasos elevados y 2 subterráneos), vallas, rampas de escape y corrales para ganado a lo largo de los 13,8 km del proyecto de ampliación de Kitt Peak y Santa Rosa (Tohono O'odham Nation 2011, 2014). Las propuestas y planes de este proyecto, resumidos más adelante, presentan una serie de presupuestos para enfrentar futuros proyectos.

La [Nación Tohono O'odham \(2011:15\)](#) consideró el diseño y costos asociados para dos pasos subterráneos ([Cuadro 1](#)). Los pasos subterráneos con barreras en la carretera incluían instalar estructuras de 14,6 m de largo con barandas a lo largo de la carretera en lugar de las vías auxiliares de 8,1 m. Esta área puede consistir de una cuneta, una pendiente recuperable, una pendiente que no se puede recuperar, y/o un área abierta. Aunque se construya un paso subterráneo más corto y posiblemente permita pasar a una mayor cantidad de especies, esta opción también representa una preocupación sobre la seguridad de los conductores asociada a las vallas. Por ello, el RTA aprobó la construcción de dos pasos subterráneos de 26,8 m de largo para facilitar el desplazamiento de la fauna mientras se habilitan vías auxiliares para mejorar la seguridad de los conductores. Aunque mejora la seguridad de los conductores, los pasos subterráneos de gran longitud pueden desalentar a algunas especies a cruzarlos.

La Nación Tohono O'odham (2014:17) propuso la construcción de dos pasos elevados para fauna con un costo estimado de 1.830 dólares/m² (Cuadro 1) basados en el diseño usado en la SR 77. Se propuso que ambos pasos tuvieran 43,9 m de largo para acomodarse a un aumento futuro de dos carriles extras. Esto resultó en un costo estimado para cada uno de los pasos (12,2 m de ancho por 43,9 m de largo) de unos 980.000 \$US. Además de los costos de la estructura, el paso elevado incluye muros de contención (139.4 m²) estimados previamente en 538 dólares el metro cuadrado, con un total de 75.000 \$US, y un trabajo que incluye relleno con tierra y nivelación del paso, en un volumen de tierra removida estimado en 1.529 m³ a un costo de 72 dólares/m³, o un total de 110.000 \$US para cada paso elevado. La altura del paso tiene que ser al menos de 6,1 m para permitir el paso de camiones de alto tonelaje.

Se estimó un costo para las vallas de 29,53 \$US/m para 13.216 m, asumiendo que la valla para la fauna silvestre sería una ampliación de la altura de la valla del derecho de vía, reduciendo así los costos (Cuadro 1). A lo largo de un segundo segmento del proyecto (13.843 m) el costo fue estimado en 39,37 dólares/m haciendo un total de 545.000 \$US. El costo total de la valla para el proyecto (27.364 m) fue de 808.000 \$US. El costo de las rampas de escape fue estimado en 6.000 \$US por unidad. Se necesita de dieciséis rampas de escape a lo largo de las vallas para fauna, con un costo total de 96.000 \$US. Los corrales laterales de ganado para controlar su acceso oscilaban entre 22.000 \$US para un corral para 5 reses y 33.000 \$US para un corral para 7 reses, con un costo total estimado de 82.000 \$US.

Hay una serie de costos de ingeniería, diseño y planificación asociados con la implementación de los elementos para la construcción de cualquier infraestructura de transporte (Cuadro 1). Específicamente para los componentes de mitigación de la SR 86, la investigación y pruebas geotécnicas que son críticas para el diseño de un paso elevado para la fauna, fueron estimadas en 100.000 \$US. Las autorizaciones ambientales, investigaciones, y la aprobación de la National Environmental Protection Agency (NEPA) fueron estimados en 50.000 \$US, los estudios arqueológicos y de restauración 150.000 \$US, los estudios sobre el derecho de vía y uso de servidumbres temporales 150.000 \$US, y el diseño de ingeniería y desarrollo de planes finales, costos estimados, y la licitación de materiales fue estimada en un 20% del total de los costos de construcción. La movilización de los contratistas y el control del tránsito fueron estimados en un 15% de los costos de construcción, las contingencias en un 25%, y el RTA en un 10% y ADOT en 5%.

Resumen

Los caminos afectan las poblaciones silvestres y su capacidad para sobrevivir a escala de paisaje. Los caminos y el tránsito tienen impactos directos e indirecto sobre la fauna silvestre, incluyendo pérdida de hábitat y fragmentación, interrupción de la conectividad genética y demográfica y mortalidad relacionada a las carreteras. Los carnívoros mayores son particularmente vulnerables a estos impactos debido a sus requerimientos de áreas grandes, bajas densidades, y tasas de reproducción bajas. Las estructuras de cruce para fauna silvestre y las vallas de exclusión

asociadas, aunque son relativamente nuevas para la infraestructura vial en Norte América, están preservando y mejorando el hábitat, la conectividad genética y demográfica, y reduciendo la mortalidad asociada a las carreteras tanto para la gente como para los animales. La integración las estructuras de cruce y las vallas a los sistemas de transporte a través de la planificación interdisciplinaria, el diseño, ubicación, construcción, y monitoreo es un elemento clave para mantener y mejorar la conectividad de los jaguares, y por ende incrementar la supervivencia a largo plazo de las subpoblaciones.

La variación genética entre las subpoblaciones de jaguares ha mostrado poca evidencia de una división geográfica significativa y de barreras para el flujo genético. Debido a esto y a los beneficios demográficos de la conectividad, mantener la conectividad entre áreas de reproducción de jaguares es un componente vital en la conservación y manejo de la especie. Se han desarrollado varios modelos sobre corredores para jaguares entre las subpoblaciones a lo largo de su distribución. Considerando las mejoras existentes y propuestas de la infraestructura de transporte a lo largo de la distribución norte del jaguar y de los impactos que las causan sobre la supervivencia y recuperación de los carnívoros grandes, incorporar estructuras de cruce a lo largo de la NRU probablemente tendrá beneficios permanentes para la conservación del jaguar, así como de otras especies silvestres, además de incrementar la seguridad de los conductores.

El personal de las agencias de recursos naturales y de transporte ha evaluado las zonas (en un área muy grande) de conectividad para la fauna silvestre con el fin de identificar y priorizar segmentos de la red vial que tengan altos niveles de accidentes con animales silvestres. La ubicación específica de las estructuras de cruce se determina cuando se elabora el proyecto luego de un completo estudio de campo que es parte de una evaluación a gran escala. Las preferencias de cada especie son aspectos claves en la planificación, ubicación, diseño y construcción de las estructuras de cruce para la fauna silvestre y las vallas de exclusión. Aún no se conoce cómo usan los jaguares los cruces debido a que no hay este tipo de estructuras en el área de distribución del jaguar. Los carnívoros grandes tienen tendencias específicas para cada especie sobre el uso de de pasos subterráneos o elevados. Debido a la falta de datos empíricos que indiquen si los jaguares tienen preferencia por los pasos elevados o subterráneos, recomendamos la construcción de cruces grandes para el paso de los jaguares y sus presas, que tengan vallas bien diseñadas para que guíen a los animales hacia la estructura de cruce y prevenga que los animales puedan treparlas o cavar bajo ellas; que tengan una buena cobertura vegetal circundante, que estén a una distancia considerable de zonas pobladas, actividad humana y fuentes artificiales de luz; y que tengan una vista hacia el hábitat al otro lado de la carretera. El monitoreo del desplazamiento de los animales antes y después de la construcción es un elemento vital para seleccionar la ubicación de los cruces y para evaluar su éxito. Por último, el monitoreo y evaluación cada cruce y vallas para fauna proporciona datos que se pueden aplicar para maximizar el desempeño de proyectos futuros y actuales que son necesarios para proteger la fauna silvestre y los conductores.

Bibliografía

- Arizona Department of Transportation. 2009. SR 77 Wildlife crossing structures, increasing permeability and maintaining connectivity, Tortolita Mountains to the Santa Catalina Mountains. Arizona Department of Transportation, Phoenix, Arizona, USA.
- Arizona Department of Transportation. 2014. State Route 77 from Tangerine Road to Pinal County Line. Projects. <<http://www.azdot.gov/projects/south-central/sr-77-from-tangerine-road-to-pinal-county-line/overview>>. Accessed 3 Nov 2014.
- Atwood, T. C., J. K. Young, J. P. Beckmann, S. W. Breck, J. Fike, O. E. Rhodes, y K. D. Bristow. 2011. Modeling connectivity of black bears in a desert sky island archipelago. *Biological Conservation* 144:2851–2862. Elsevier Ltd.
- Beckmann, J. P., A. P. Clevenger, M. P. Huijser, y J. A. Hilty, editors. 2010. Safe passages: highways, wildlife and habitat connectivity. Island Press, Washington DC, USA.
- Beier, P. 1995. Dispersal of juvenile cougars in fragmented habitat. *Journal of Wildlife Management* 59:228–237.
- Bissonette, J. A., y M. Hammer. 2000. Effectiveness of earthen return ramps in reducing big game highway mortality in Utah. Utah Cooperative Fish and Wildlife Research Unit Report Series 2000 1:1–29.
- Brody, A. J., y M. R. Pelton. 1989. Effects of roads on black bear movements in western North Carolina. *Wildlife Society Bulletin* 17:5–10.
- Chruszcz, B., A. P. Clevenger, K. E. Gunson, y M. L. Gibeau. 2003. Relationships among grizzly bears, highways, and habitat in the Banff-Bow Valley, Alberta, Canada. *Canadian Journal of Zoology* 81:1378–1391.
- Clevenger, A. P., B. Chruszcz, y K. E. Gunson. 2001. Highway mitigation fencing reduces wildlife-vehicle collisions. *Wildlife Society Bulletin* 29:646–653.
- Clevenger, A. P., B. Chruszcz, K. Gunson, y J. Wierzchowski. 2002. Roads and wildlife in the Canadian Rocky Mountain Parks - movements, mortality and mitigation. Final report (October 2002). Report prepared for Parks Canada, Banff, Alberta, Canada.
- Clevenger, A. P., y A. T. Ford. 2010. Wildlife crossing structures, fencing, and other highway design considerations. Páginas 17–49 en J. P. Beckmann, A. P. Clevenger, M. P. Huijser, y J. A. Hilty, editores. Safe passages: highways, wildlife and habitat connectivity. Island Press, Washington DC, USA.
- 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 DC, 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.
- Craighead, L., A. Craighead, y L. Oechsli. 2011. Bozeman pass post-fencing wildlife monitoring. Craighead Institute, Bozeman, Montana, USA.
- Cramer, P. C., y J. A. Bissonette. 2005. Wildlife crossings in North America: the state of the science and practice. C. L. Irwin, P. Garrett, y K. P. McDermott, editores. *Proceedings of the International Conference on Ecology and Transportation*. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
- D'Angelo, G. J., S. A. Valitzski, K. V Miller, y G. R. Gallagher. 2005. Thinking outside the marketplace: a biologically based approach to reducing deer-vehicle collisions. Páginas 662–665 *en* C. L. Irwin, P. Garrett, y K. P. McDermott, editores. *Proceedings of the International Conference on Ecology and Transportation*. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
- Dodd, N., y J. Gagnon. 2008. Preacher Canyon Wildlife Fence and Crosswalk Enhancement Project State Route 260, Arizona. First year progress report. Project JPA 04-088. Arizona Game and Fish Department, Research Branch, Phoenix, Arizona, USA.
- Dodd, N. J., J. Gagnon, y R. E. Schweinsburg. 2003. Quarterly progress report 6. Evaluation of measures to minimize wildlife-vehicle collisions and maintaining wildlife permeability across highways. Arizona Game and Fish Department, Research Branch, Phoenix, Arizona, USA.
- Dodd, N. L., J. W. Gagnon, S. Boe, A. Manzo, y R. E. Schweinsburg. 2007. Evaluation of measures to minimize wildlife-vehicle collisions and maintain wildlife permeability across highways - State Route 260, Arizona, USA. Final project 540 report (2002-2006). Phoenix, Arizona, USA.
- Dodd, N. L., y J. W. Gagnon. 2010. Arizona state route 260: promising wildlife permeability, highway safety, and agency cultural change. Páginas 257–274 *en* J. P. Beckmann, A. P. Clevenger, M. P. Huijser, and J. A. Hilty, editores. *Safe passages: highways, wildlife and habitat connectivity*. Island Press, Washington DC, USA.
- Donaldson, B. M. 2005. Use of highway underpasses by large mammals and other wildlife in Virginia and factors influencing their effectiveness. Páginas 433–441 *en* C. L. Irwin, P. Garrett, y K. P. McDermott, editores. *Proceedings of the International Conference on Ecology and Transportation*. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
- Eizirik, E., J. H. Kim, M. Menotti-Raymond, P. G. Crawshaw, S. J. O'Brien, y W. E. Johnson. 2001. Phylogeography, population history and conservation genetics of jaguars (*Panthera onca*, Mammalia, Felidae). *Molecular Ecology* 10:65–79.

- Ferreras, P., J. J. Aldama, J. F. Beltran, y M. Delibes. 1992. Rates and causes of mortality in a fragmented population of Iberian lynx *Felis pardini* Temminck, 1824. *Biological Conservation* 61:197–202.
- Ford, A. T., A. P. Clevenger, y K. Rettie. 2010. The Banff wildlife crossings project: An international public-private partnership. Páginas 157–172 en J. P. Beckmann, A. P. Clevenger, M. Huijser, y J. A. Hilty, editores. *Safe passages: highways, wildlife and habitat connectivity*. Island Press, Washington DC, USA.
- Forman, R. T. T., y L. E. Alexander. 1998. Roads and their ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematic* 29:207–231.
- Forman, R. T. T., D. Sperling, J. A. Bissonette, A. P. Clevenger, C. D. Cutshall, V. H. Dale, L. Fahrig, R. France, C. R. Goldman, K. Heanue, J. A. Jones, F. J. Swanson, T. Turrentine, y T. C. Winter. 2003. *Road Ecology*. Island Press, Washington DC, USA.
- Foster, M. L., y S. R. Humphrey. 1995. Use of highway underpasses by Florida panthers and other wildlife. *Wildlife Society Bulletin* 23:95–100.
- Fuller, T. K. 1989. Population dynamics of wolves in North-Central Minnesota. *Wildlife Monographs* 105:3–41.
- Gerlach, G., y K. Musolf. 2000. Fragmentation of landscape as a cause for genetic subdivision in bank voles. *Conservation Biology* 14:1066–1074.
- Gloyne, C., y A. P. Clevenger. 2001. Cougar *Puma concolor* use of wildlife crossing structures on the Trans-Canada Highway in Banff National Park, Alberta. *Wildlife Biology* 7:117–124.
- Gordon, K., y S. Anderson. 2003. Evaluation of an underpass installed in U.S. Highway 3 - at Nugget Canyon, Wyoming, for mitigating mule deer. Final Report. FHWA-WY-03/01F. Wyoming Cooperative Fish and Wildlife Research Unit, Laramie, Wyoming, USA.
- Hardy, A. R., J. Fuller, M. P. Huijser, A. Kociolek, y M. Evans. 2007. Evaluation of wildlife crossing structures and fencing on US Highway 93 Evaro to Polson phase I: preconstruction data collection and finalization of evaluation plan. Western Transportation Institute, Montana State University, Bozeman, Montana, USA.
- Hardy, A. R., J. Fuller, S. Lee, L. Stanley, y A. Al-Kaisy. 2006. Bozeman Pass wildlife channelization ITS project final report. Western Transportation Institute, Montana State University, Bozeman, Montana, USA.
- Hilty, J. A., W. Z. Lidicker, y A. M. Merenlender. 2006. *Corridor ecology: the science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation*. Island Press, Washington DC, USA.

- Huijser, M. P., T. D. Holland, M. Blank, M. C. Greenwood, P. T. McGowen, B. Hubbard, y S. Wang. 2009. The comparison of animal detection systems in a test-bed: a quantitative comparison of system reliability and experiences with operation and maintenance. Final report. Western Transportation Institute, Montana State University, Bozeman, Montana, USA.
- Huijser, M. P., A. Kociolek, P. McGowen, A. Hardy, A. P. Clevenger, y R. Ament. 2007. Wildlife-vehicle collision and crossing mitigation measures: A toolbox for the Montana Department of Transportation. Western Transportation Institute, Montana State University, Bozeman, Montana, USA.
- Huijser, M. P., P. McGowen, J. Fuller, A. Hardy, A. Kociolek, A. P. Clevenger, D. Smith, y R. Ament. 2008. Wildlife-vehicle collision reduction study: Report to Congress. FHWA-HRT-08-034. Federal Highway Administration, McLean, Virginia, USA.
- Huijser, M. P., y P. T. McGowen. 2010. Reducing wildlife-vehicle collisions. Páginas 51–74 *en* J. P. Beckmann, A. P. Clevenger, M. P. Huijser, y J. A. Hilty, editores. Safe passages: highways, wildlife and habitat connectivity. Island Press, Washington DC, USA.
- Iuell, B., G. J. (Hans) Bekker, R. Cuperus, J. Dufek, G. Fry, C. Hicks, V. Hlavác, V. Keller, B. Le Maire Wandall, C. Rosell, T. Sangwine, y N. Tørsløv. 2003. Habitat fragmentation due to transportation infrastructure, wildlife and traffic - a European handbook for identifying conflicts and designing solutions. European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research, Brussels, Belgium.
- Jackson, S. D., y C. R. Griffin. 2000. A strategy for mitigating highway impacts on wildlife. Páginas 143–159 *en* T. A. Messmer y B. West, editores. Wildlife and highways: seeking solutions to an ecological and socio-economic dilemma. The Wildlife Society, Bethesda, Maryland, USA.
- Jackson, S. D. 1999. Overview of transportation related wildlife problems. Páginas 1–4 *en* G. L. Evink, P. Garrett, y D. Zeigler, editores. Proceedings of the Third International Conference on Wildlife Ecology and Transportation. FL-ER-73-99. Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida, USA.
- Jaeger, J. a. G., J. Bowman, J. Brennan, L. Fahrig, D. Bert, J. Bouchard, N. Charbonneau, K. Frank, B. Gruber, y K. T. von Toschanowitz. 2005. Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior. *Ecological Modelling* 185:329–348.
- Jaeger, J. a. G., y L. Fahrig. 2004. Effects of road fencing on population persistence. *Conservation Biology* 18:1651–1657.
- Jalkotzy, M., e I. Ross. 1993. Cougar responses to human activity at Sheep River, Alberta. Arc Wildlife Services, Calgary, Alberta, Canada.

- Johnson, W. E., E. Eizirik, y S. J. O'Brien. 2002. Evolution and genetics of jaguar populations: implications for future conservation efforts. Páginas 519–534 *en* R. A. Medellín, K. Redford, J. Robinson, E. Sanderson, y A. Taber, editores. *Jaguars in the New Millennium: A Status Assessment, Priority Detection, and Recommendations for the Conservation of Jaguars in the Americas*. Universidad Nacional Autónoma de México and Wildlife Conservation Society, Mexico DF.
- Knapp, K. K., X. Yi, T. Oakasa, W. Thimm, E. Hudson, y C. Rathmann. 2004. Deer-vehicle crash countermeasure toolbox: a decision and choice resource. Final report. Report Number DVCIC - 02. Midwest Regional University Transportation Center, Deer-Vehicle Crash Information Clearing House, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, USA.
- Logan, K., y L. Irwin. 1985. Mountain lion habitats in the Big Horn Mountains, Wyoming. *Wildlife Society Bulletin* 13:257–262.
- Long, R. A., P. MacKay, W. J. Zielinski, y J. C. Ray, editors. 2008. *Noninvasive survey methods for carnivores*. Island Press, Washington DC, USA.
- Maehr, D. S. 1997. *Florida panther life and death of a vanishing carnivore*. Island Press, Washington DC, USA.
- Maffei, L., J. Polisar, R. Garcia, J. Moreira Ramirez, y A. Noss. 2011. Perspectives from ten years of jaguar camera trapping in Mesoamerica. *Mesoamericana* 49–59.
- Van Manen, F. T., M. D. Jones, J. L. Kindall, L. M. Thompson, y B. K. Scheick. 2001. Determining the potential mitigation effects of wildlife passageways on black bears. *International Conference on Ecology and Transportation* 4:435–446.
- Mata, C., I. Hervás, J. Herranz, F. Suárez, J. E. E. Malo, I. Hervas, y F. Suarez. 2005. Complementary use by vertebrates of crossing structures along a fenced Spanish motorway. *Biological Conservation* 124:397–405.
- Matthews, S. M., J. P. Beckmann, y A. R. Hardy. 2014. Review of road passage designs for jaguars. Wildlife Conservation Society final report to the U.S. Fish and Wildlife Service in response to Solicitation F14PX00340, submitted 28 August 2014, Bronx, New York, USA.
- McGuire, T. 2012. No ordinary highway: A thirty-year retrospective, Trans Canada Highway, Banff National Park of Canada. Páginas 197–201 *en* S. Weber, editor. *Rethinking protected areas in a changing world: Proceedings of the 2011 George Wright Society Conference on Parks, Protected Areas, and Cultural Sites*. The George Wright Society, Hancock, Michigan, USA.
- Meyer, E. 2006. Assessing the effectiveness of deer warning signs. Final report KTRAN:KU03-6. The University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA.

- Mills, L. S., y R. Y. Conrey. 2003. Highways as potential barriers to movement and genetic exchange in small mammals. Final report. FHWA/MT-02-013/8152. Federal Highway Administration, Helena, Montana, USA.
- Mosler-Berger, C., y J. Romer. 2003. Wildwarnsystem. *Wildbiology* 3:1–12.
- Ng, S. J., J. W. Dole, R. M. Sauvajot, S. P. D. Riley, y T. J. Valone. 2004. Use of highway undercrossings by wildlife in southern California. *Biological Conservation* 115:499–507.
- Noss, R. F., H. B. Quigley, M. G. Hornocker, T. Merrill, y P. C. Paquett. 1996. Conservation biology and carnivore conservation in the Rocky Mountains. *Conservation Biology* 10:949–963.
- Noss, R. F. 1991. Landscape connectivity: different functions at different scales. Páginas 27–39 *en* W. E. Hudson, editor. *Landscape linkages and biodiversity*. Island Press, Washington DC, USA.
- Ortega, Y. K., y D. E. Capen. 1999. Effects of forest roads on habitat quality for ovenbirds in a forested landscape. *The Auk* 116:937–946.
- Pojar, T. M., R. A. Prosenice, D. F. Reed, y T. N. Woodard. 1975. Effectiveness of a lighted animated deer crossing sign. *Journal of Wildlife Management* 39:87–91.
- Polisar, J., T. G. O'Brien, S. M. Matthews, J. P. Beckmann, E. W. Sanderson, O. C. Rosas-rosas, C. A. López-gonzález, y T. G. O. Brien. 2014. Review of Jaguar Survey and Monitoring Techniques and Methodologies. Wildlife Conservation Society final report to the U.S. Fish and Wildlife Service in response to Solicitation F13PX01563, submitted March 27, 2014. 110 pp. plus appendices.
- 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.
- Reed, D. F., y A. L. Ward. 1985. Efficacy of methods advocated to reduce deer–vehicle accidents: research and rationale in the USA. Páginas 285–293 *en*. *Routes et faune sauvage*. Service d'Etudes Techniques de Routes et Autoroutes, Bagneaux, France.
- Reijnen, R., y R. Foppen. 1994. The effects of car traffic on breeding bird populations in woodland. I. Evidence of reduced habitat quality for willow warblers (*Phylloscopus trochilus*) breeding close to a highway. *Journal of Applied Ecology* 31:85–94.
- Riley, S. P. D., J. P. Pollinger, R. M. Sauvajot, E. C. York, C. Bromley, T. K. Fuller, y R. K. Wayne. 2006. A southern California freeway is a physical and social barrier to gene flow in carnivores. *Molecular Ecology* 15:1733–1741.

- Rogers, E. 2004. An ecological landscape study of deer vehicle collisions in Kent County, Michigan. White Water Associates Inc. Prepared for Kent County Road Commission, Grand Rapids, Michigan, USA.
- Ruediger, B. 2007. Management considerations for designing carnivore highway crossings. Páginas 546–555 en C. L. Irwin, D. Nelson, y K. P. McDermott, editores. Proceedings of the 2007 International Conference on Ecology and Transportation. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
- Ruiz-García, M., L. F. Pacheco, y D. Álvarez. 2009. Genetic characterization of the Bolivian Andean puma (*Puma concolor*) at the Sajama National Park (SNP) and relationships with other north-western South American puma populations. *Revista Chilena de Historia Natural* 82:97–117.
- Sanderson, E. W., y K. Fisher. 2013. Jaguar habitat modeling and database update. Wildlife Conservation Society, Bronx, New York, USA.
- Scheick, B. K., y M. D. Jones. 1999. US64 wildlife underpass placement report. North Carolina Wildlife Resources Commission, Raleigh, North Carolina, USA.
- Servheen, C., y L. Lawrence. 2003. Wildlife use in relation to structure variables for a sampling of bridges and culverts under I-90 between Alberton and St. Regis, Montana. Interim Report. Montana Department of Transportation, Helena, Montana, USA.
- Sielecki, L. E. 2004. WARS 1983-2002: Wildlife accident reporting and mitigation in British Columbia. Special annual report. Ministry of Transportation, Victoria, British Columbia, Canada.
- Singleton, P. H., y J. F. Lehmkuhl. 1999. Assessing wildlife habitat connectivity in the Interstate 90 Snoqualmie Pass corridor, Washington. Páginas 75–83 en G. L. Evink, P. Garrett, y D. Zeigler, editores. Proceedings of the Third International Conference on Wildlife Ecology and Transportation. FL-ER-73-99r. Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida, USA.
- Slater, F. M. 2002. An assessment of wildlife road casualties-the potential discrepancy between number counted and numbers killed. *Web Ecology* 3:33–42.
- Smith, D. 1999. Identification and prioritization of ecological interface zones on state highways in Florida. Páginas 209–230 en G. L. Evink, P. Garrett, y D. Zeigler, editores. Proceedings of the Third International Conference on Wildlife Ecology and Transportation. FL-ER- 73-99. Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida, USA.
- Stanley, L., A. Hardy, y S. Lassacher. 2006. Driver responses to enhanced wildlife advisories in a simulated environment. Transportation Research Board 2006 Annual Meeting CD-ROM. Transportation Research Board, Washington DC, USA.

- Stoner, K. J., A. R. Hardy, K. Fisher, y E. W. Sanderson. 2014. Jaguar habitat connectivity and identification of potential road mitigation locations in the U.S. Fish & Wildlife Service Northwestern Recovery Unit. Wildlife Conservation Society, draft report submitted to the U.S. Fish and Wildlife Service in response to Solicitation F14PX00340, submitted 12 December 2014, Bozeman, Montana, USA.
- Strasburg, J. L. 2006. Roads and genetic connectivity. *Nature* 440:875–876.
- Swihart, R. K., y N. A. Slade. 1984. Road crossing in *Sigmodon hispidus* and *Microtus ochrogaster*. *Journal of Mammalogy* 65:357–360.
- The Arizona Wildlife Linkages Workgroup. 2006. Arizona's Wildlife Linkages Assessment. Arizona Department of Transportation, Phoenix, Arizona, USA.
- Tohono O'odham Nation. 2011. Kitt Peak Linkage, wildlife crossings retrofit, a staged implementation approach, State Route 86 - mileposts 130-136. Tohono O'odham Nation, Sells, Arizona, USA.
- Tohono O'odham Nation. 2014. Kitt Peak linkage wildlife connectivity: wildlife overpasses and fencing State Route 86. Tohono O'odham Nation, Sells, Arizona, USA.
- U.S. Fish and Wildlife Service. 2012. Recovery Outline a for the Jaguar (*Panthera onca*). Tucson, Arizona, USA.
- Ward, A. L. 1982. Mule deer behavior in relation to fencing and underpasses on Interstate 80 in Wyoming. *Transportation Research Record* 859:8–13.
- Waters, D. 1988. Monitoring program-mitigation measures. Trans Canada Highway Twinning. km 0-11.4. Final report. Banff National Park Warden Service, Banff, Alberta, Canada.
- Woods, J. G. 1990. Effectiveness of fences and underpasses on the trans-Canada highway and their impact on ungulate populations. Report to Banff National Park Warden Service, Banff, Alberta, Canada.
- Van der Zee, F. F., J. Wiertz, C. J. F. Ter Braak, y R. C. Apeldoorn. 1992. Landscape change as a possible cause of the badger *Meles meles* L. decline in The Netherlands. *Biological Conservation* 61:17–22.
- Zeller, K. 2007. Jaguars in the new millennium data set update: the state of jaguar in 2006. Wildlife Conservation Society, Bronx, New York, USA.

Cuadro 1. Costos estimados para los elementos del Proyecto de Conectividad de Fauna Silvestre en la Conexión Kitt Peak a lo largo de los 13,8 km del proyecto de ampliación de la Ruta 86 en Kitt Peak y Santa Rosa, Estado de Arizona (Tohono O’odham Nation 2011, 2014).

Elemento del Proyecto	Descripción	Unidades	Costos	Total
Construcción				
Pasos subterráneos con barreras	Arcos prefabricados para paso subterráneo	Alto: 2,1 m Ancho: 6,1 m Largo: 14,6 m		\$313.800
Pasos subterráneos con barreras	Arcos prefabricados para paso subterráneo	Alto: 3,4 m Ancho: 7,3 m Largo: 14,6 m		\$337.940
Pasos subterráneos con vías auxiliares.	Arcos prefabricados para paso subterráneo	Alto: 2,1 m Ancho: 9,8 m Largo: 26,8 m		\$355.540
Pasos subterráneos con vías auxiliares.	Arcos prefabricados para paso subterráneo	Alto: 3,4 m Ancho: 9,8 m Largo: 26,8 m		\$390.740
Pasos elevados	Estructura del puente	Ancho: 12,2 m Largo: 43.9 m	\$1.830/m ²	\$979.200
	Muros de contención		\$538/m ²	\$75.000
	Relleno/nivelación		\$72/m ²	\$110.000
Vallas para fauna Silvestre	Vallas de 1.8 m	27.364 m	\$29,53/m	\$808.000
Medidas de escape	Rampas para escape de fauna	16	\$6.000 cada una	\$96.000
Controles de acceso	Corrales para Ganado (7 cabezas)	1	\$33.000 cada uno	\$33.000
	Corrales para Ganado (6 cabezas)	1	\$27.000 cada uno	\$27.000
	Corrales para Ganado (5 cabezas)	1	\$27.000 cada uno	\$27.000
Ingeniería/ Diseño				
Investigación/Pruebas	Geotécnicos	1 por estructura	\$50.000	\$50.000
Limpieza de la zona	Estudios y NEPA	1 por proyecto	\$50.000	\$50.000
Derecho de vía	Estudios y TCE	1 por proyecto	\$150.000	\$150.000
Diseño final	Planos finales, costos	20% de los costos de construcción		
Arqueología	Investigación/restauración	1 por proyecto	\$150.000	\$150.000
Mobilización /Administración				
Mobilización		15% de los costos de construcción		
Control de Tránsito		15% de los costos de construcción		
Contingencias		25% de los costos de construcción		
Administración de la Construcción		10% de los costos de construcción		
Permisos de Construcción		5% de los costos de construcción		

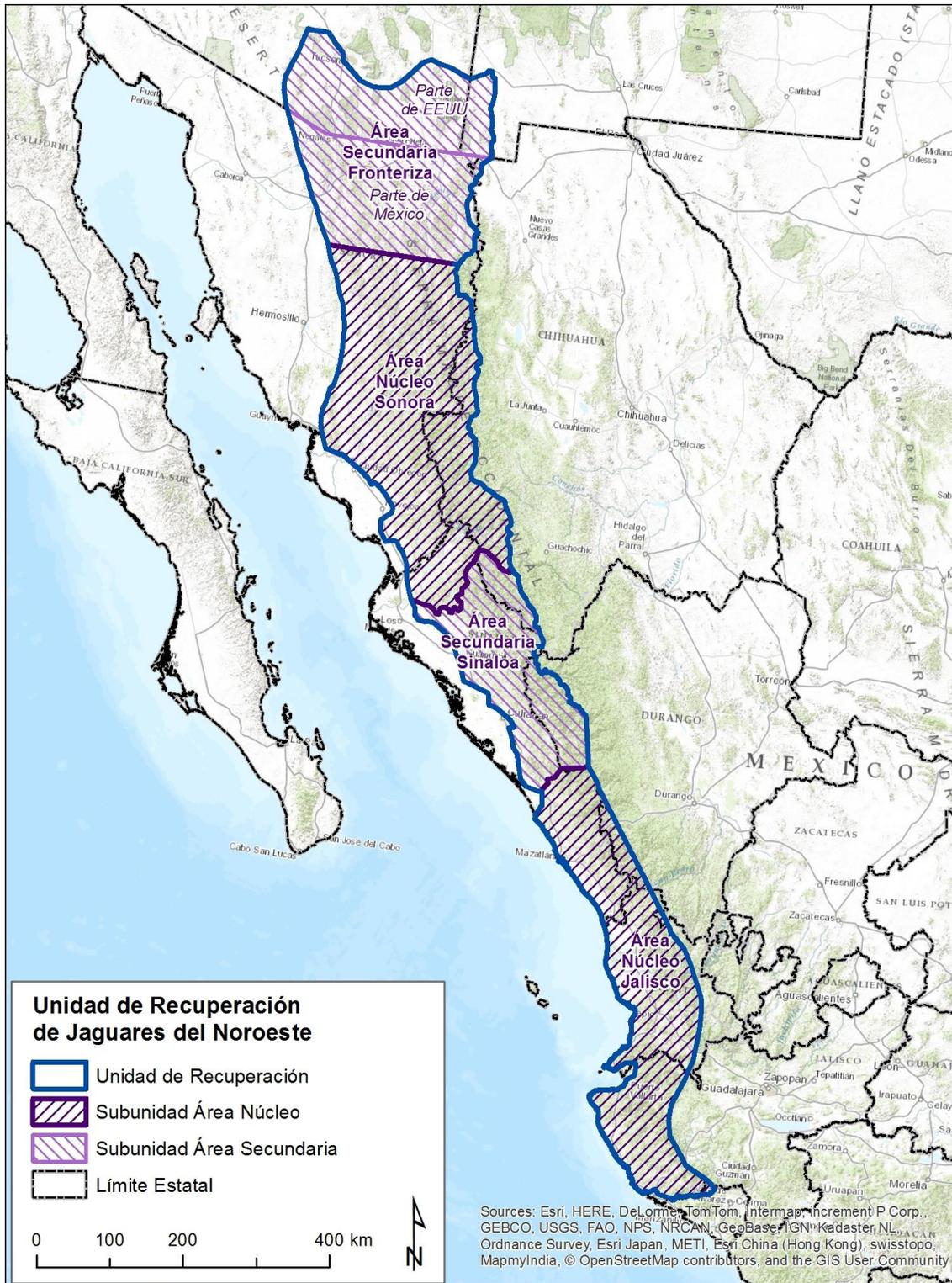


Figura 1. Los 226.826 km² de la Unidad de Recuperación del Jaguar del Noroeste (NRU) se extienden a lo largo de la frontera entre Estados Unidos y México con 29.021 km² en Estados Unidos y 197.805 km² en México (Sanderson y Fisher 2013).