

Las carreteras al mar: estudio sobre el impacto de los vertebrados silvestres y los ecosistemas circundantes en dos corredores viales de Colombia*

Roads to the sea: A Case Study on the Impacts on Wildlife and the Environment from Two Contemporary Roads of Colombia

-  Diana Carolina Stasiukynas**
 Ángela Mejía***
 Jorge Lizarazo****
 Carlos Mario Wagner-Wagner*****
 Maria Fernanda Gómez*****
 Esteban Payán*****



*Este artículo surge como proyecto de investigación de Panthera, Cali, Colombia en Convenio de Asociación 105 de 2017 con la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

** Investigadora Panthera, Colombia. Correo electrónico: dstasiukynas@panthera.org

*** Analista del paisaje, Panthera, Cali, Colombia. Correo electrónico: amejia@panthera.org

**** Investigador Panthera, Cali, Colombia. Correo electrónico: jlizarazo@panthera.org

***** Investigador Panthera, Cali, Colombia. Correo electrónico: cwagner@panthera.org

***** Coordinadora de proyectos en Panthera, Cali, Colombia. Correo electrónico: mgomez@panthera.org

***** Director Regional para América del Sur, Panthera, Cali, Colombia. Correo electrónico: epayan@panthera.org

Fecha de recepción: 3 de marzo de 2020

Fecha de aceptación: 18 de julio de 2020

Cómo referenciar / How to cite

Stasiukynas, D. C.; Mejía, Á.; Lizarazo, J.; Wagner-Wagner, C. M.; Gómez, M. F.; Payán, E. (2021). Las carreteras al mar: estudio sobre el impacto de los vertebrados silvestres y los ecosistemas circundantes en dos corredores viales de Colombia. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, v. 13, n. 24, 11-36. <https://doi.org/10.22430/21457778.1637>

Resumen: la construcción de carreteras al interior o en proximidad de áreas naturales ha sido identificada como una de las principales causas de pérdida y fragmentación del hábitat en todo el mundo. En el departamento del Valle del Cauca, Colombia, dos corredores viales, en distintas etapas de desarrollo, comunican a la ciudad de Cali con el puerto de Buenaventura. Para evaluar y cuantificar los impactos que tienen estas carreteras en las poblaciones silvestres de fauna de la zona se desarrolló un proyecto de investigación en dos fases: modelación de corredores y validación en campo. Las interacciones entre las poblaciones de fauna silvestre y estos corredores viales fueron evaluadas y cuantificadas a partir del modelamiento de corredores con información proveniente de los sistemas de información geográfica (SIG) respaldados por datos tomados en campo sobre estructuras de drenaje, atropellamientos y registros de fototrampeo. Se identificaron cuatro zonas prioritarias de cruce para nueve especies de mamíferos. Tras evaluar 738 estructuras viales, se registraron 19 especies utilizando estas estructuras y 38 especies fueron atropelladas en ambas carreteras. Dichas vías difieren en estructuras y trazados, sin embargo, comparten sus problemáticas como la falta de estructuras viales preexistentes adecuadas para el paso de fauna, su uso como refugio y el desarrollo poco estructurado en su periferia son las causas del efecto de barrera que limita la conectividad y flujo génico de animales en esta zona.

Palabras clave: atropellamiento, conectividad del hábitat, corredor biológico, desarrollo sostenible, ecología de carreteras.

Abstract: Road construction in or near natural areas has been identified as a major cause of habitat loss and fragmentation worldwide. In the department of Valle del Cauca, Colombia, two road corridors in different stages of development run from the city of Cali to the Buenaventura seaport. A research project was developed in two phases to evaluate and quantify the impacts these roads have on the wild fauna populations in the area: corridor modeling and field validation. Interactions between wildlife populations and these road corridors were evaluated and quantified by modelling the corridors with information from geographic information systems (GIS) supported by field data on drainage structures, road traffic jams and photo-

trapping records. Four priority crossing areas were identified for nine mammal species. After evaluating 738 road structures, 19 species were recorded using these road structures and 38 species were run over on both roads. These roads differ in structures and layouts, however, their problems are shared, such as the lack of pre-existing road structures suitable for the passage of fauna, their use as a refuge and the poorly structured development on their periphery are the causes of the barrier effect that limits connectivity and gene flow of animals in this area.

Keywords: Road kills, habitat connectivity, biological corridor, road ecology, sustainable development, model validation.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas viales presenta una serie de factores de cambio que afectan de forma directa e indirecta a las poblaciones silvestres (Forman et al., 2003). La construcción de carreteras al interior o en proximidad de áreas naturales ha sido identificada como una de las principales causas de pérdida y fragmentación de hábitats (Laurance et al., 2009). En la actualidad, se estima que para el 2050 se habrán construido 25 millones de kilómetros de carreteras, 90 % de los cuales estarán en países en desarrollo (Laurance et al., 2014). En países como Colombia, los planes de desarrollo y la construcción de nuevos sistemas viales trae consigo el establecimiento desmesurado de nuevos cascos urbanos, aumentando los efectos negativos de las carreteras sobre la fauna (Ibisch et al., 2016; Laurance et al., 2014). Por tal razón, es importante realizar evaluaciones de los factores bióticos y abióticos de los ecosistemas circundantes a las carreteras, así como estudios de ecología y comportamiento de las especies ahí presentes (Pomareda García et al., 2014) para desarrollar planes de infraestructura vial que puedan mitigar ese impacto.

En el departamento del Valle del Cauca, el estado de degradación de los hábitats naturales por causas como la deforestación, desecación de ecosistemas acuáticos, contaminación, cacería descontrolada y tráfico ilegal de fauna han llevado a la extinción local de algunas especies y otras a un estado precario. El desarrollo agropecuario e industrial son los principales motores de pérdida de biodiversidad descritos para esta región (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras et al., 2006). El puerto de Buenaventura es una de las obras de infraestructura más importantes del departamento, debido a su rol en la economía local y nacional. Al ser el puerto más grande de Colombia y el único en el Valle del Cauca, su infraestructura vial implica un continuo desarrollo y mejoramiento para garantizar la conectividad con el interior del país (Gutiérrez et al., 2012). Sin embargo, durante la planeación de este proyecto vial no se tuvieron en cuenta los impactos directos e indirectos sobre los ecosistemas circundantes, zonas clave para la biodiversidad continental (Londoño-Murcia et al., 2010), así como los problemas económicos, sociales y ambientales asociados a la deforestación y el establecimiento de nuevos cascos urbanos asociados a las vías (Vilela et al., 2020).

Este estudio busca evaluar algunos de los impactos de esta obra de infraestructura sobre su biodiversidad circundante, tomando en cuenta los efectos que tienen

las dos carreteras que comunican a Cali con Buenaventura sobre las poblaciones de vertebrados silvestres. Partiendo del principio de que los impactos de las carreteras sobre las poblaciones silvestres son el resultado de la suma de diversas variables ambientales, ecológicas y especie-específicas (Pomareda García et al., 2014) y que estas dos carreteras se encuentran en diferentes estados de desarrollo, fueron incluidos modelos espaciales que posteriormente se validaron en campo a partir de recorridos sistemáticos de atropellamiento, evaluación de estructuras viales y fototrampeo. De esta forma, este documento presenta la importancia de incluir estudios de ecología del comportamiento durante las fases de planeación y construcción de sistemas viales.

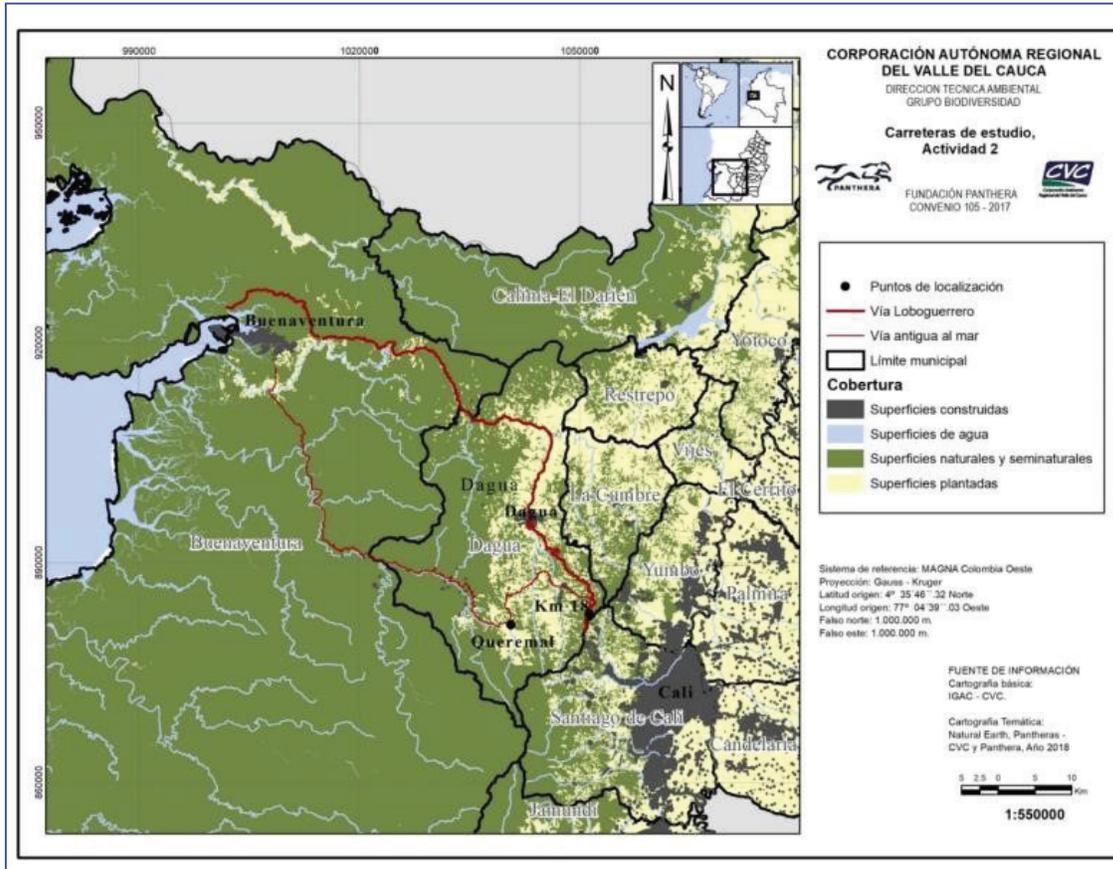
METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio hace parte de la vertiente del Pacífico de la cordillera Occidental y de la Unidad de Conservación del Jaguar del Chocó Biogeográfico (Figura 1), una zona de gran importancia ecológica. Esta región cuenta con una amplia variedad de hábitats, que van desde manglares, playas, costas rocosas, desiertos costeros, hasta algunas de las selvas tropicales más húmedas del mundo, las cuales se conectan con sistemas montañosos, lo que ha propiciado la evolución de *islas* de endemismo de la región, es decir especies que no se encuentran en ninguna otra parte (Payán Garrido et al., 2015).

La zona de estudio comprende los dos corredores viales entre Cali y el puerto de Buenaventura: la antigua vía al mar y la concesión vial de Loboguerrero, a lo largo de los municipios de Cali, Dagua y Buenaventura. La antigua vía al mar es un corredor vial de 141 km (PI: 3.530105 N, 76.6200076 W, PF: 3.78105 N, 76.982276 W) en su mayoría sin pavimentar (90 km) y de bajo tráfico vehicular (76 vehículos/24 h). De esta carretera se evaluaron dos tramos de 20 km cada uno (PI₁: 3.530105 N, 76.620076 W, PF₁: 3.572919 N, 76.7736672 W, PI₂: 3.845451 N, 77.000405 W, PF₂: 3.78105 N, 76.982276 W). Paralela a esta, se encuentra la concesión vial de Loboguerrero con una longitud total de 162.2 km, pavimentada en su totalidad y con un alto tráfico vehicular (768 vehículos/24 h). El tramo evaluado de la concesión correspondió a una sección de 126.5 km (PI: 3.528992 N, 76.620591 W, PF: 3.751164 N, 76.661509 W).

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio



Fuente: elaboración propia.

Análisis del paisaje

Utilizando la herramienta Corridor Designer para ArcGIS (Majka et al., 2007) se modelaron corredores biológicos utilizando el método de la Ruta de Menor Costo (MRMC) para las nueve especies identificadas como vulnerables al impacto vial que, según la revisión de literatura y el interés de este proyecto son: jaguar (NT¹; *Panthera onca*), puma (LC; *Puma concolor*), Ocelote (LC; *Leopardus tigrinus*), margay (NT; *Leopardus wiedii*), yaguarundí (LC; *Herpailurus yagouaroundi*), Pecarí de labio blanco (VU; *Tayassu pecari*), Guartinaja (LC; *Cuniculus paca*), Venado de cola blanca (LC; *Odocoileus virginianus*) y Mono araña de cabeza negra (EN; *Ateles*

¹ Las siglas se refieren al estado de conservación de las especies, según la clasificación elaborada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza-UICN: (DD) datos insuficientes, (LC) preocupación menor, (NT) casi amenazada, (VU) vulnerable, (EN) en peligro, (CR) en peligro crítico, (EW) extinta en estado silvestre, (EX) extinta.

fusciceps). El MRMC está basado en una capa de idoneidad de hábitat, en la cual son evaluadas espacialmente las condiciones ideales para cada especie.

Esta capa geográfica se creó a través de criterio experto, teniendo en cuenta la biología y ecología de cada especie, y se escogieron las siguientes variables que influyen en la selección de hábitat: altitud, inclinación del terreno, cobertura, distancia a vías pavimentadas y distancia a cuerpos de agua. Posteriormente, se otorgó un peso de 0 a 100 para todos los píxeles dentro del área de estudio, donde 100 indica condiciones idóneas de la variable, y se ponderó cada una de las variables según su nivel de influencia sobre la preferencia de hábitat. Finalmente, fueron sumados los resultados de todas las variables para obtener la matriz de idoneidad de hábitat y se mantuvieron estos mismos valores para las variables de distancia a carreteras pavimentadas, pendiente del terreno y distancia a cuerpos de agua, para todas las especies.

Evaluación de estructuras viales

Las estructuras viales presentes en las dos carreteras fueron georreferenciadas, fotografiadas y evaluadas siguiendo el formato de evaluación propuesto por Kintsch y Cramer (2011). Posteriormente, las estructuras se superpusieron a los corredores modelados y se priorizaron según los siguientes criterios: (i) estructuras de alta importancia cuando estas se superponen a corredores de más de cinco especies, (ii) de importancia media cuando se superponen a corredores de una a cuatro especies, y (iii) sin importancia cuando no se superponen a ningún modelo.

Recorridos de atropellamiento

Se realizaron recorridos crepusculares a lo largo de los transectos definidos para las dos carreteras, en intervalos de tres días, iniciando a las 6.00 a. m. (Degregorio et al., 2011) en un vehículo con una velocidad media de 30 km/h. Cada registro incluyó los siguientes datos: fecha, hora, punto GPS, nombre de la especie, datos sobre la topografía de la carretera y fotografías del animal atropellado. Para evitar sobrestimación de los datos de atropellamiento, todos los animales encontrados se retiraron de la carretera (Degregorio et al., 2011). Los individuos se identificaron con base en la clasificación y nomenclatura actualizada, según la sistemática y taxonomía conocida (Ayerbe Quiñones, 2018; McMullan, 2018), a partir de la

literatura especializada disponible (Emmons & Feer, 1997; Hilty & Brown, 1986; Wilson & Reeder, 2005).

A partir de los resultados obtenidos en campo se realizaron análisis de riqueza con el programa EstimateS 9.1 (Chao & Jost, 2012; Colwell et al., 2012) y se modelaron los puntos calientes de atropellamiento usando la herramienta HotSpot Analysis de ArcGis 10.6 (Rowcliffe, 2015; Costa et al., 2015; Collinson et al., 2014).

Fototrampeo

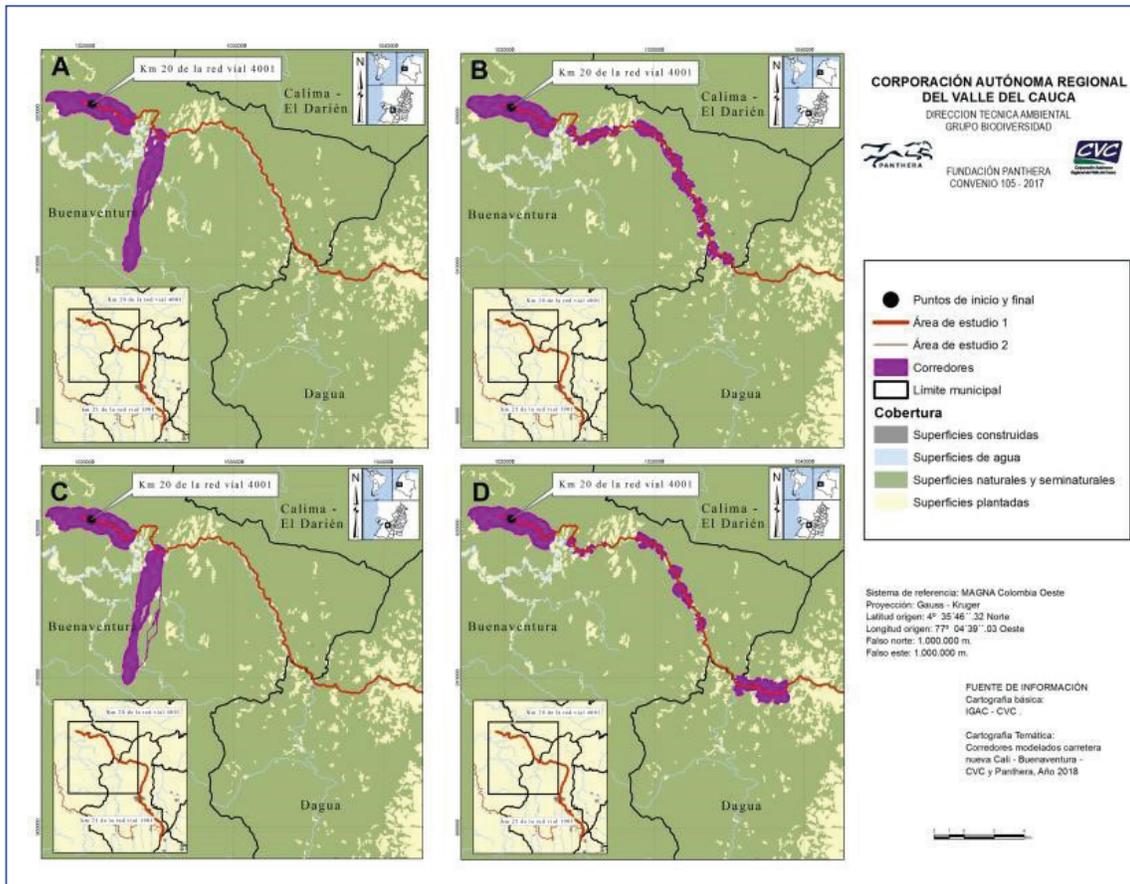
Se instalaron 26 cámaras Cuddeback C1 al interior de las estructuras viales priorizadas, a una altura adecuada para captar todos vertebrados terrestres incluyendo ratones y colúbridos. Las cámaras se programaron para trabajar de forma continua durante 24 horas y capturar imágenes en un periodo de 60 días (Jenelle et al., 2002; Silver, 2004). Aquellas fotografías consecutivas de la misma especie con 30 minutos de diferencia (O'Brien et al., 2003), se consideraron como eventos independientes. Se calculó la riqueza y abundancia relativa de especies usando las herramientas EstimateS 9.1 (Chao & Jost, 2012; Colwell et al., 2012) y R (The R Foundation, 2018).

RESULTADOS

Análisis del paisaje

Los corredores modelados para las nueve especies de mamíferos mostraron que existen cuatro puntos prioritarios de paso, correspondientes a remanentes boscosos con un área mayor a 30 km² (ver Figuras 2 a 5). En Loboguerrero, la Reserva Forestal del Pacífico (según los límites demarcados por la Ley 2 de 1959) y los remanentes boscosos del municipio de Dagua fueron identificados como zonas prioritarias de paso para el jaguar, el puma, el margay, el yaguarundí, el pecarí de labio blanco, la paca, el venado de cola blanca, la marimonda del Chocó (ver Figuras 2 y 3).

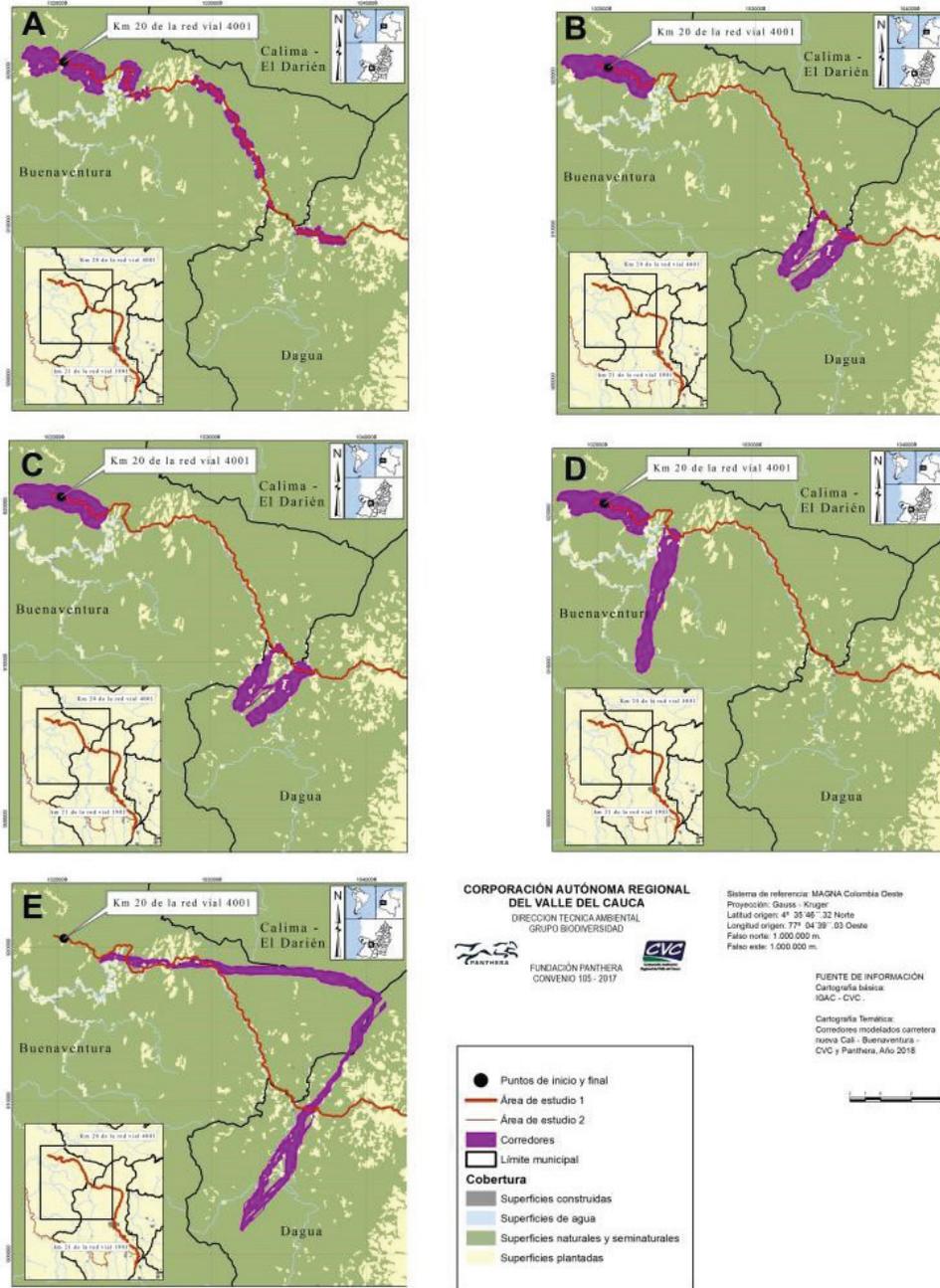
Figura 2. Corredores modelados en la vía de Loboguerrero para cuatro especies de vertebrados



Fuente: elaboración propia.

- Nota: A. Mono araña (*A. fusciceps*).
 B. Venado de cola blanca (*O. virginianus*).
 C. Guatinaja (*C. paca*).
 D. Pecarí de labio blanco o tatabro (*T. pecari*).

Figura 3. Corredores modelados en la vía de Loboguerrero para cinco especies de vertebrados

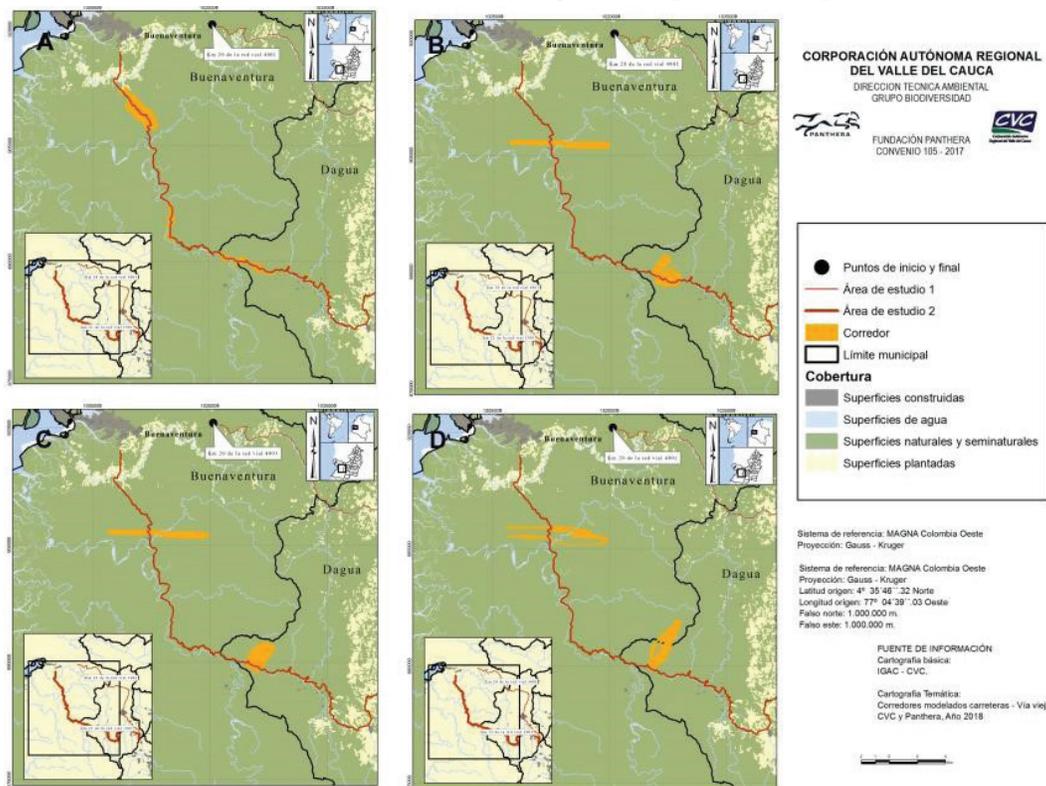


Fuente: elaboración propia.

- Nota: A. Jaguar (*P. onca*).
 B. Puma (*P. concolor*).
 C. Yaguarundí (*H. yagouaroundi*).
 D. Margay (*L. wiedii*).
 E. Oncilla (*L. tigrinus*).

Las áreas identificadas como potenciales pasos de fauna en la antigua vía al mar corresponden a tres zonas con buena cobertura boscosa (>70 %). A diferencia de Loboguerrero, los corredores para oncilla se excluyeron del modelo, debido a que el límite altitudinal de la carretera es menor a 1500 m s. n. m. La superposición de los corredores indica que existen dos áreas de paso prioritarias para las ocho especies modeladas (ver Figuras 4 y 5). El primer corredor hace referencia a las zonas boscosas de la cuenca baja del río Anchicayá, caracterizada por coberturas continuas de bosque húmedo, pendientes poco pronunciadas, y la presencia de dos grandes afluentes, el río Anchicayá y el río Dagua. El segundo corredor modelado corresponde a la zona boscosa de la cuenca alta del río Dagua, que se caracteriza por su inclinación media y coberturas boscosas de transición entre bosque alto andino y bosque húmedo tropical.

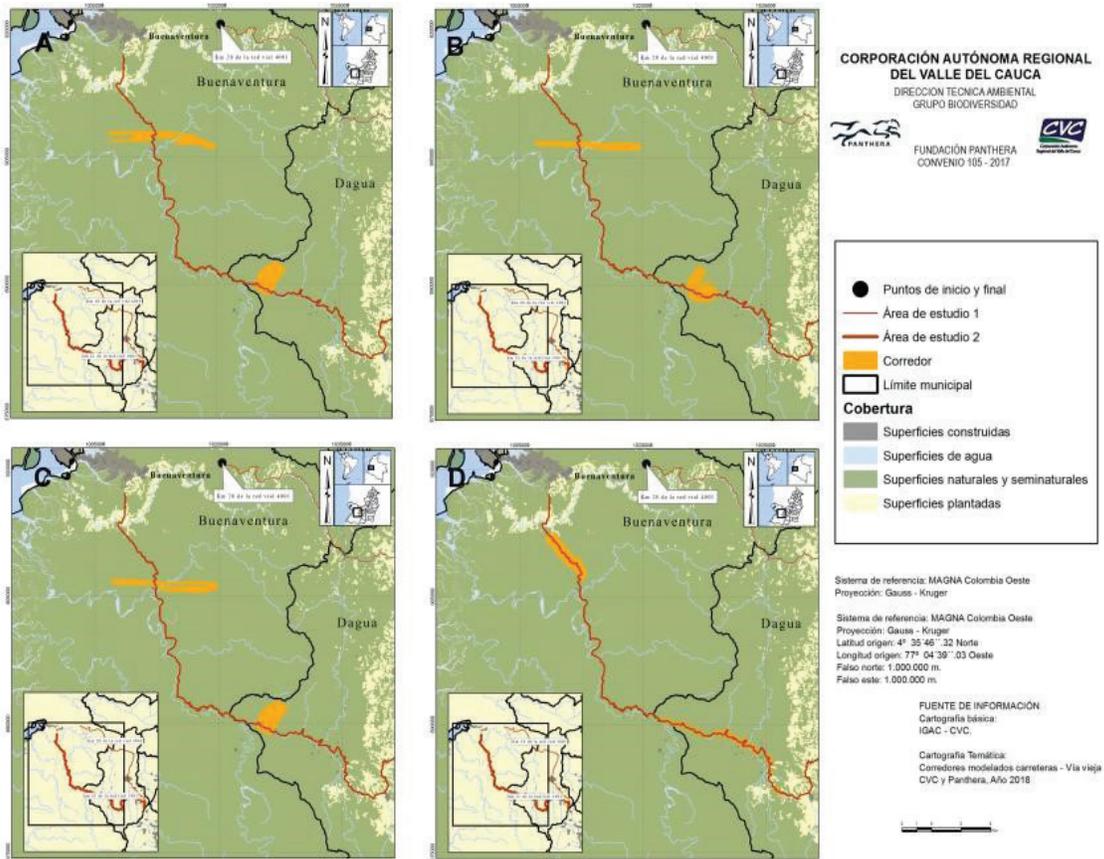
Figura 4. Corredores modelados en la vía a antigua al mar para cuatro especies de vertebrados



Fuente: elaboración propia.

- Nota: A. Mono araña (*A. fusciceps*).
B. Venado de cola blanca (*O. virginianus*).
C. Guatinaja (*C. paca*).
D. Pecarí de labio blanco o tatabro (*T. pecari*).

Figura 5. Corredores modelados en la vía antigua al mar para cuatro especies de vertebrados



Fuente: elaboración propia.

- Nota: A. Mono araña (*A. fusciceps*).
B. Venado de cola blanca (*O. virginianus*).
C. Guatinaja (*C. paca*).
D. Pecarí de labio blanco o tatabro (*T. pecari*).

Evaluación de estructuras viales

Durante los recorridos se evaluaron y georreferenciaron un total de 784 estructuras viales: 494 en Loboguerrero y 290 en la vía antigua al mar. Al superponer estas estructuras con los corredores modelados se determinó que para Loboguerrero existen 163 estructuras prioritarias para el paso de fauna, de las cuales 45 son de alta prioridad y 118 de prioridad media (Tabla 1). Entre las estructuras catalogadas como de alta prioridad, ubicadas en la zona correspondiente a un área forestal de protección del departamento, ninguna representa un buen paso para la fauna. Las estructuras más críticas son los rellenos, ya que son barreras impenetrables

y en donde la carretera se encuentra al mismo nivel del dosel. Adicionalmente, ninguna de las estructuras de drenaje cercana a los rellenos es adecuada para el paso de fauna. En cuanto a las estructuras de prioridad media corresponden a puentes asociados a quebradas o cuerpos de agua temporales. De las 291 estructuras evaluadas para la antigua vía al mar, se seleccionaron nueve para priorizar (Tabla 1), las cuales corresponden a alcantarillados y puentes asociados a cuerpos de agua permanentes o temporales, con buena vegetación circundante y buenos sustratos naturales.

Tabla 1. Priorización de estructuras viales a partir de la presencia de corredores modelados

Vía	Prioridad	N. ° corredores modelados	Estructuras				Total
			Alcantaril- lados	Box- culvert	Relleno	Puente	
Loboguerrero	Baja	0	306	8	3	14	331
	Media	1 - 4	93	2	7	16	118
	Alta	5 - 8	35	0	9	1	45
Vía antigua al mar	Baja	0	254	12	1	15	282
	Media	1 - 4	6	0	0	1	7
	Alta	5 - 8	1	0	0	1	2

Fuente: elaboración propia.

Recorridos de atropellamiento

Se hicieron recorridos en un total de 3328 km, correspondientes a 19 réplicas para cada uno de los tramos de estudio (2403 km en Loboguerrero, 925 km en la vía antigua al mar). Durante los recorridos se registraron 175 eventos independientes de atropellamiento. El mayor número de eventos de atropellamiento se registró en la vía de Loboguerrero ($n=117$)², seguido de los tramos de la carretera antigua ($n=48$). A su vez, se registraron 29 especies: dos anfibios, once reptiles (identificados hasta especie), nueve aves y cinco mamíferos (Anexo 1), sin incluir las especies domésticas (gatos, perros y gallinas). Los índices de diversidad CHAO1 y Jack1, presentaron valores de 89 % y 86 % para Loboguerrero y la vía antigua al mar, respectivamente. A su vez, las curvas de rarefacción sugieren que es necesario un mayor esfuerzo de muestreo para registrar el total las especies atropelladas.

² n (número de eventos).

Puntos calientes de atropellamiento

Al modelar los puntos calientes de atropellamiento se identificaron tres zonas prioritarias en Loboguerrero, correspondientes al área de transición entre el bosque nublado y el bosque xerofito del municipio de Dagua. En cuanto a la antigua vía al mar se identificó una única sección (ver Tabla 2 y Figura 6).

Tabla 2. Ubicación de los puntos calientes modelados para las dos carreteras con sus respectivos intervalos de confianza calculados

Intervalos de confianza	Ubicación *		Carretera
	Punto inicial	Punto final	
90 %	586 m	13.9 km	Loboguerrero
	26.6 km	30.7 km	Antigua vía al mar
95 %	15.6 km	18.8 km	Loboguerrero
99 %	22 km	25.5 km	Loboguerrero

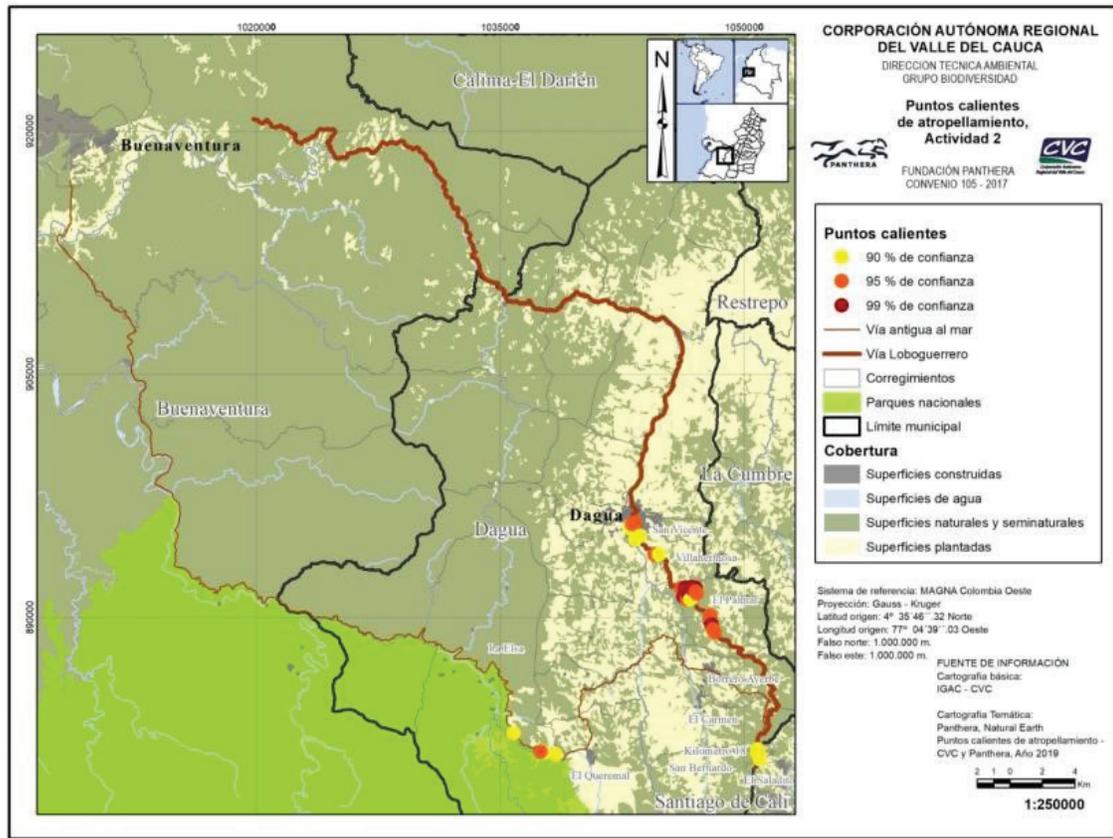
* Ubicación de los puntos en sentido Cali-Buenaventura

Fuente: elaboración propia.

Al incluir las variables estructurales y ambientales tomadas en campo se determinó que existen características del paisaje comunes entre los eventos de atropellamiento. En Loboguerrero, los puntos calientes modelados corresponden a zonas pobladas asociadas a estratos de vegetación que varían desde zonas boscosas hasta cultivos. La mayoría de los registros (70 %) están asociados a zonas donde la carretera se encuentra a nivel de la vegetación y se presentan curvas pronunciadas a menos de 200 m. Similar a estos puntos, la zona de atropellamiento correspondiente a la antigua vía al mar se caracteriza por la presencia de vegetación a nivel de carretera y curvas pronunciadas en ambos costados. No obstante, los puntos en esta vía se agrupan en zonas de bosque nublado lejos de zonas pobladas.

La relación entre las especies atropelladas y los puntos modelados es diferente para cada carretera. En el caso de la vía de Loboguerrero los puntos calientes corresponden a reportes de especies resilientes, las zarigüeyas (*Didelphis marsupialis*) y el sapo común (*Rhinella marina*), junto a especies domésticas como gatos, perros y gallinas. En cuanto a la vía antigua al mar, las especies representadas en cada punto modelado corresponden en su mayoría a serpientes y en menor proporción a anfibios.

Figura 6. Mapa de los tramos de estudio con la identificación de los puntos calientes de atropellamiento



Fuente: elaboración propia.

Fototrampeo

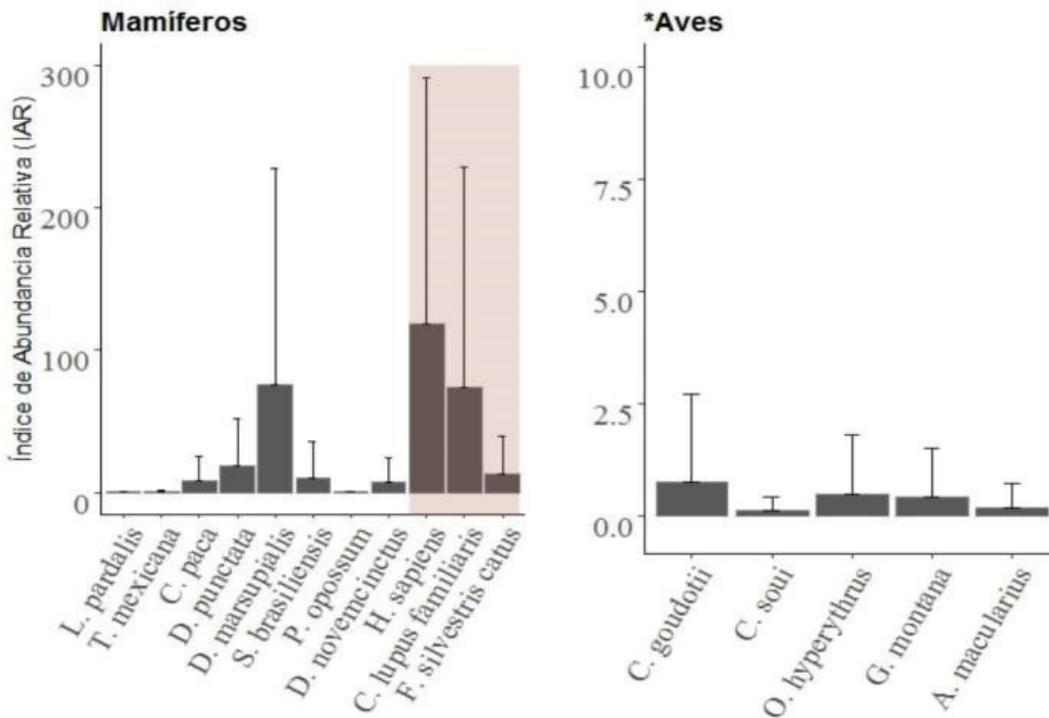
Se analizaron 15 de las 26 estaciones instaladas, puesto que 11 de ellas fueron robadas. En 616 trampas-noche se registraron 19 especies de vertebrados medianos y grandes, pertenecientes a las clases Aves, Mammalia y Reptilia, que representan entre el 74.6 % (Jack1) y el 79.5 % (CHAO1) de la comunidad de especies presentes en la zona. Se resalta el registro de la perdiz colorada (*Odontophorus hyperthrus*) que, según La Lista Roja de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (2020) se encuentra en la categoría casi amenazada (NT).

La zarigüeya común (*Didelphis marsupialis*; n= 121, IAR= 19.643 %)³ y la paca (*C. paca*; n= 13, IAR= 2.112 %) son las especies de mamíferos que utilizaron de forma más frecuente estas estructuras. Algunas aves como la pava maraquera (*Chamaepetes*

³ n (número de eventos); IAR (Índice de Abundancia Relativa por especie).

goudotii; n= 8, IAR= 1.299 %), la paloma-perdiz roja (*Geotrygon montana*; n= 6, IAR= 0.974 %) y la perdiz colorada (*Odontophorus hyperythrus*; n= 5, IAR= 0.812 %) también se reportaron cruzando las estructuras (Figura 7). En contraste, los registros de perros, gatos y humanos (n= 350) al interior de las estructuras superan el número total de registros de fauna silvestre (n= 231), evidenciando que estas son las especies más abundantes al interior de las estructuras viales.

Figura 7. Índice de abundancia relativa (IAR) por estructura potencial de paso de fauna



Fuente: elaboración propia.

Nota: Se muestran en rojo los datos correspondientes a humanos, perros y gatos. Para *aves= se presenta un menor rango en variable "y" comparado con mamíferos.

DISCUSIÓN

Los corredores modelados muestran cuatro puntos prioritarios de conectividad, dos para cada una de las carreteras. Sin embargo, al superponer los corredores con las estructuras viales preexistentes se encontró que las estructuras priorizadas no son funcionales. Esta limitante es común en las dos carreteras, pero su efecto sobre la permeabilidad difiere; como la antigua vía al mar es una carretera sin pavimentar, con bajo flujo vehicular, zonas boscosas mejor conservadas y poco

mantenimiento, esta puede favorecer el paso de fauna silvestre más allá de las estructuras viales preexistentes (Hlaváč & Anděl, 2006). En Loboguerrero, las estructuras presentes en los corredores corresponden a rellenos y sistemas de alcantarillado que representan barreras físicas para la fauna, limitando su dispersión (Bennett, 2003; Epps et al., 2005). Esta ruptura en la conectividad puede llevar a efectos negativos a nivel poblacional, pues interrumpe el flujo genético que, a su vez, puede tener como consecuencia futuras extinciones locales (Epps et al., 2005).

Las estructuras funcionales para el uso de fauna silvestre se han caracterizado por tener sustratos naturales, buena visibilidad y la presencia de vegetación nativa circundante asociada (Smith et al., 2015; Martinig & Bélanger-Smith, 2016). No obstante, ninguna de las estructuras evaluadas para las dos carreteras en este estudio cumple con todos los requerimientos y, por lo tanto, se clasificaron como *parcialmente funcionales*. Más aún, su funcionalidad disminuye como resultado del uso por parte de humanos y animales domésticos, haciendo que estos lugares puedan ser percibidos por la fauna silvestre como potencialmente peligrosos, evitando su uso (Parsons et al., 2016). Se recomienda la modificación y adecuación de las 47 estructuras identificadas como de alta prioridad en las dos carreteras (45 en Loboguerrero y 2 en la antigua vía al mar) como drenajes y pasos de fauna en las zonas de corredor modeladas.

En cuanto a los puntos de atropellamiento, se encontró que no corresponden a los corredores modelados, pudiendo estar relacionado con la falta de estructuras de paso idóneas en los lugares con mayor vegetación nativa. Es importante resaltar que la mayoría de los eventos de atropellamiento reportados tuvieron lugar en un paisaje altamente intervenido, donde la matriz corresponde a zonas destinadas a fincas de recreo y cultivos asociados a pequeños parches de vegetación. Lo anterior reafirma la importancia en la planeación de pasos de fauna, previo a la construcción de las carreteras, destinados a la mitigación del atropellamiento y el aislamiento poblacional (Bennett, 2003; Rao et al., 2018).

No obstante, los grupos de especies atropelladas en cada una de las carreteras es diferente, al igual que las características asociadas a la matriz del paisaje. En el caso de la vía antigua al mar, las especies más vulnerables pertenecen a los grupos de anfibios y reptiles, cuyos registros corresponden en su totalidad a individuos atropellados. La modelación de puntos calientes para esta carretera muestra que

las zonas de mayor riesgo corresponden a las zonas mejor conservadas de bosque alto andino, donde se evidenció que el poco mantenimiento de las bermas ha favorecido el crecimiento de la vegetación sobre la carretera. Estas zonas ricas en vegetación ofrecen nuevas zonas de refugio, alimentación y reproducción, tanto para anfibios como para reptiles (Shine et al., 2004; MacKinnon et al., 2005, Jochimsen et al., 2014) aumentando el riesgo de estos grupos a ser atropellados.

A diferencia de la vía antigua al mar, los puntos calientes de atropellamiento en la vía de Loboguerrero corresponden principalmente a especies de mamíferos. Entre las especies silvestres se encuentran la zarigüeya común (*D. marsupialis*), el armadillo de nueve bandas (*Dasyopus novemcinctus*) y el conejo (*Sylbilagus brasiliensis*), siendo la zarigüeya la especie atropellada con mayor frecuencia (n= 31). Al modelar los puntos calientes de atropellamiento para Loboguerrero se encontró que estos corresponden a zonas donde la carretera consta de un costado con buena vegetación nativa o zonas de cultivo, mientras que en el otro se encuentran paredes de vegetación. Esta combinación de variables aumenta el riesgo de estos mamíferos debido a sus hábitos nocturnos (Ford & Fahrig, 2007) y a su estrategia de detenerse al percibir un vehículo acercándose (Jacobson et al., 2016) en zonas de alto tráfico vehicular como lo es esta carretera (Jaeger et al., 2005).

Los resultados de atropellamiento y fototrampeo muestran que las especies reportadas con mayor frecuencia son aquellas generalistas y tolerantes a altos grados de perturbación como zarigüeyas (*D. marsupialis*) y sapos (*Rhinella marina*). El registro de estas especies, tanto en fotografías como en la carretera, sugiere que el impacto que tienen estas vías va más allá de su construcción, al ser motores de desarrollo que traen consigo un crecimiento desmesurado de cascos urbanos, llevando a modificaciones en el paisaje y pérdida de hábitat (Bennett, 2017). Estos procesos, a su vez, llevan al desplazamiento de especies con amplios requerimientos de hábitat hacia zonas aún más lejanas de las vías (Forman, 2000; Assis et al., 2019). Por lo tanto, la ausencia de registros de especies como el jaguar, el pecarí de labio blanco y el venado de cola blanca, podría indicar que probablemente estos animales no solo evitan las carreteras, sino las zonas pobladas circundantes y recientemente desarrolladas asociadas a estas (Forman, 2000), desencadenando procesos de corte de flujo genético debido al aislamiento poblacional (Bennett, 2003; Rao et al., 2018).

Lo anterior sugiere que adecuaciones a las vías actuales pueden mejorar la conectividad y disminuir atropellamientos. Estos resultados también sugieren que en una eventual ampliación se deben tener diseños de desagües y alcantarillas con diseños adecuados para su uso por parte de la fauna, tramos donde se limita el uso y desarrollo de los costados de la carretera (Payan et al., 2013), y un manejo de taludes y de rellenos apropiado para estimular su uso por parte de la fauna terrestre y evitar el aislamiento de estas poblaciones (Bennett, 2017).

CONCLUSIONES

Los corredores modelados para las nueve especies seleccionadas no cuentan con estructuras adecuadas para el paso de fauna, lo que indica que estas carreteras representan una barrera para la conectividad de estas especies.

Los atropellamientos de fauna tuvieron lugar en las zonas con mayor grado de perturbación y no se solaparon con los corredores modelados. Sumado a esto, las especies atropelladas con mayor frecuencia son generalistas y altamente tolerantes a procesos de perturbación antrópica, lo cual indica que la permeabilidad de las vías está fuertemente asociada a procesos de desarrollo urbano no planificado.

Las dos carreteras evaluadas poseen características del paisaje diferentes y afectan distintamente a la fauna, por lo cual se resalta la importancia de analizar previamente las características particulares de cada sistema vial y su afectación potencial a la biodiversidad circundante.

Los resultados de este estudio reafirman la importancia de incluir la delimitación de potenciales corredores de fauna durante el diseño y la planeación de carreteras como insumos importantes al momento de decidir la ubicación y tipo de estructuras a implementar. Esto implica que la construcción de vías no debe enfocarse únicamente en la mitigación del atropellamiento, sino también en herramientas que faciliten la prevención. Se insiste en la importancia del manejo del desarrollo urbano asociado a las vías, el cual tiene efectos negativos no solo sobre la fauna silvestre, sino sobre los ecosistemas.

REFERENCIAS

- Assis, J. C.; Giacomini, H. C.; Ribeiro, M. C. (2019). Road Permeability Index: Evaluating the heterogeneous permeability of roads for wildlife crossing. *Ecological Indicators*, v. 99, 365-374. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.012>
- Ayerbe Quiñones, F. (2018). *Guía Ilustrada de la Avifauna Colombiana*. Wildlife Conservation Society.
- Bennett, A. F. (2003). *Linkages in the Landscape. The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2004.FR.1.en>
- Bennett, V. J. (2017). Effects of Road Density and Pattern on the Conservation of Species and Biodiversity. *Current Landscape Ecology Reports*, v. 2, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40823-017-0020-6>
- Chao, A; Jost, L. (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: Standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, v. 93, n. 12, 2533-2547. <https://doi.org/10.1890/11-1952.1>
- Collinson, W. J.; Parker, D. M.; Bernard, R. T. F.; Reilly, B. K.; Davies-Mostert, H. T. (2014). Wildlife Road Traffic Accidents: A Standardized Protocol for Counting Flattened Fauna. *Ecology and Evolution*, v. 4, n. 15, 3060-3071. <https://doi.org/10.1002/ece3.1097>
- Colwell, R. K.; Chao, A.; Gotelli, N. J.; Lin, S. Y.; Mao, C. X.; Chazdon, R. L.; Longino, J. T. (2012). Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. *Journal of Plant Ecology*, v. 5, n. 1, 3-21. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr044>
- Costa, A. S.; Ascensão, F.; Bager, A. (2015). Mixed sampling protocols improve the cost-effectiveness of roadkill surveys. *Biodiversity and Conservation*, v. 24, 2953-2965. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0988-3>
- Degregorio, B. A.; Hancock, T. E.; Kurz, D. J.; Yue, S. (2011). How Quickly Are Road-Killed Snakes Scavenged? Implications for Underestimates of Road Mortality. *Journal of the North Carolina Academy of Science*, v. 127, n. 2, 184-88. <https://www.jncas.org/doi/abs/10.7572/2167-5880-127.2.184>
- Emmons, L. H.; Feer, F. (1997). *Neotropical rainforest mammals: A field guide* (2.a ed.). The University of Chicago Press.

- Epps, C. W.; Palsbøll, P. J.; Wehausen, J. D.; Roderick, G. K.; Ramey II, R. R.; McCullough, D. R. (2005). Highways block gene flow and cause a rapid decline in genetic diversity of desert bighorn sheep. *Ecology Letters*, v. 8, n. 10, 1029-1038. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00804.x>
- Ford, A. T.; Fahrig, L. (2007). Diet and body size of North American mammal road mortalities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 12, n. 7, 498-505. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.07.002>
- Forman, R. T. T.; Sperling, D.; Bissonette, J. A.; Clevenger, A. P.; Cutshall, C. D.; Dale, V. H.; Fahrig, L.; France, R.; Goldman, C. R.; Heanue, K.; Jones, J. A.; Swanson, F. J.; Turrentine, T.; Winter, T. C. (2003). *Road Ecology: Science and Solutions*. Island Press.
- Forman, R. T. T. (2000). Estimate of the Area Affected Ecologically by the Road System in the United States. *Conservation Biology*, v. 14, n. 1, 31-35. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99299.x>
- Gutiérrez, D. F.; Pereira Urrea, M. C.; Piraján Díaz, J.; Urrea Ríos, I. L. (2012). La Puerta de Ébano del Pacífico Colombiano. El Puerto de Buenaventura 2000-2010. *Econografos*, n. 31. <http://doi.org/10.2139/ssrn.2620003>
- Hilty, S. L.; Brown, W. L. (1986). *A Guide to the Birds of Colombia*. Princeton University Press.
- Hlaváč, V.; Anděl, P. (2006). *On the permeability of roads for wildlife: A handbook*. <https://www.semanticscholar.org/paper/On-The-Permeability-Of-Roads-For-Wildlife-A-Hlav%C3%A1c-Andel/bd278de9031731d557583b16634affc529ea9f7b>
- Ibisch, P. L.; Hoffmann, M. T.; Kreft, S.; Pe'er, G.; Vassiliki, K.; Biber-Freudenberger, L.; DellaSala, D. A.; Vale, M. M.; Hobson, P. R.; Selva, N. (2016). A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, v. 354, n. 6318, 1423-1427. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7166>
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras; Universidad del Valle; Instituto para la Investigación y la Preservación del Patrimonio Cultural y Natural del Valle del Cauca. (2006). *Bases científicas y valoración de la biodiversidad marina y costera de Bahía Málaga (Valle del Cauca), como uno de los instrumentos necesarios para que sea considerada un Área Protegida*. http://www.invemar.org.co/documents/10182/13789/9860IF_BIOMALAGA2007.pdf/9ee8dadab-a43e-46aa-a9d5-7c6cfb3c40c5

- Jacobson, S. L.; Bliss-Ketchum, L. L.; de Rivera, C. E.; Smith, W. P. (2016). A behavior-based framework for assessing barrier effects to wildlife from vehicle traffic volume. *Ecosphere*, v. 7, n. 4, 1-15. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1345>
- Jaeger, J. A. G.; Bowman, J.; Brennan, J.; Fahrig, L.; Bert, D.; Bouchard, J.; Charbonneau, N.; Frank, K.; Gruber, B.; von Toschanowitz, K. T. (2005). Predicting when animal populations are at risk from roads: An interactive model of road avoidance behavior. *Ecological Modelling*, v. 185, n. 2-4, 329-348. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.12.015>
- Jenelle, C. S.; Runge, M. C.; MacKenzie, D. L. (2002). The use of photographic rates to estimate densities of tigers and other cryptic mammals: a comment on misleading conclusions. *Animal Conservation*, v. 5, n. 2, 119-120. <https://doi.org/10.1017/S1367943002002160>
- Jochimsen, D. M.; Peterson, C. R.; Harmon, L. J. (2014). Influence of ecology and landscape on snake road mortality in a sagebrush-steppe ecosystem. *Animal Conservation*, v. 17, n. 6, 583-592. <https://doi.org/10.1111/acv.12125>
- Kintsch, J.; Cramer, P. C. (2011). *Permeability of Existing Structures for Terrestrial Wildlife: A Passage Assessment System*. <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/777.1.pdf>
- Laurance, W. F.; Clements, G. R.; Sloan, S.; O'Connell, C. S.; Mueller, N. D.; Goosem, M.; Venter, O.; Edwards, D. P.; Phalan, B.; Balmford, A.; Van Der Ree, R.; Burgues Arrea, I. (2014). A global strategy for road building. *Nature*, n. 513, 229-232. <https://doi.org/10.1038/nature13717>
- Laurance, W. F.; Goosem, M.; Laurance, S. G. W. (2009). Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 24, n. 12, 659-669. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.009>
- Ley 2 de 1959. Sobre economía forestal de la nación y conservación de recursos naturales renovables. 16 de diciembre de 1958. D. O. 29861.
- Londoño-Murcia, M. C.; Tellez-Valdés, O.; Sánchez-Cordero, V. (2010). Environmental heterogeneity of World Wildlife Fund for Nature ecoregions and implications for conservation in Neotropical biodiversity hotspots. *Environmental Conservation*, v. 37, n. 2, 116-127. <https://doi.org/10.1017/S0376892910000391>

- Majka, D.; Jenness, J.; Beier, P. (2007). *CorridorDesigner: ArcGIS tools for designing corridors*. <http://corridordesign.org/downloads>
- Martinig, A. R.; Bélanger-Smith, K. (2016). Factors influencing the discovery and use of wildlife passages for small fauna. *Journal of Applied Ecology*, v. 53, n. 3, 825-836. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12616>
- MacKinnon, C. A.; Moore, L. A.; Brooks, R. J. (2005). Why Did the Reptile Cross the Road? Landscape Factors Associated with Road Mortality of Snakes and Turtles in the South Eastern Georgian Bay area. In *Proceedings of the Parks Research Forum of Ontario (PRFO) and Carolinian Canada Coalition (CCC) Annual General Meeting* (pp. 153-166). <https://casiopa.ca/abs-file-download/id/kXYOMHgX0EDwmMjhbhcGpmg>
- McMullan, M. (2018). *Field Guide to the Birds of Colombia*. Rey Naranjo Editores.
- O'Brien, T. G.; Kinnaird, M. F.; Wibisono, H. T. (2003). Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. *Animal Conservation*, v. 6, n. 2, 131-139. <https://doi.org/10.1017/S1367943003003172>
- Parsons, A. W.; Bland, C.; Forrester, T.; Baker-Whatton, M. C.; Schuttler, S. G.; McShea, W. J.; Costello, R.; Kays, R. (2016). The ecological impact of humans and dogs on wildlife in protected areas in eastern North America. *Biological Conservation*, v. 203, 75-88. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.09.001>
- Payan, E.; Soto, C.; Diaz-Pulido, A.; Benítez, A.; Hernández, A. (2013). Wildlife road crossing and mortality: lessons for wildlife friendly road design in Colombia. https://www.researchgate.net/profile/Esteban_Payan/publication/281118678_WILDLIFE_ROAD_CROSSING_AND_MORTALITY_LESSONS_FOR_WILDLIFE_FRIENDLY_ROAD_DESIGN_IN_COLOMBIA/links/55d7408b08aeb38e8a85a37b.pdf
- Payán Garrido, E.; Moreno Foglia, O.; Mejía González, A.; Fonseca Aldana, M.; Valderrama Vásquez, C. (2015). *Plan de Manejo para la conservación del jaguar (Panthera onca) en el Valle del Cauca, Colombia*. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Plan-de-manejo-para-la-conservacion-del-jaguar_Panthera.pdf
- Pomareda García, E.; Araya Gamboa, D.; Ríos Montero, Y.; Arévalo Huevo, E.; Aguilar Ruiz, M. C.; Menacho Odio, R. M. (2014). *Guía Ambiental. "Vías amigables con la vida silvestre"*. https://www.researchgate.net/publication/307946704_

Guia_Ambiental_Vias_Amigables_con_la_Vida_Silvestre_Environmental_Guide_Wildlife_Friendly_Roads

The R Foundation. (2018). The R Project for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Rao, Y.; Zhang, J.; Xu, Q.; Wang, S. (2018). Sustainability assessment of road networks: A new perspective based on service ability and landscape connectivity. *Sustainable Cities and Society*, v. 40, 471-483. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.013>

Rowcliffe, M. (2015). *Activity: Animal Activity Statistics*. <https://rdrr.io/cran/activity/>

Shine, R.; Lemaster, M.; Wall, M.; Langkilde, T.; Mason, R. (2004). Why Did the Snake Cross the Road? Effects of Roads on Movement and Location of Mates by Garter Snakes (*Thamnophis sirtalis parietalis*). *Ecology and Society*, v. 9, n. 1. <https://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art9/>

Silver, S. (2004). *Estimando la abundancia de jaguares mediante trampas-cámara*. <https://www.yumpu.com/es/document/read/25137252/estimando-la-abundancia-de-jaguares-mediante-trampas-panthera>

Smith, D. J.; van der Ree, R.; Rosell, C. (2015). Wildlife Crossing Structures: An Effective Strategy to Restore or Maintain Wildlife Connectivity Across Roads. En R. van der Ree; D. J. Smith; C. Grilo (editores), *Handbook of Road Ecology* (pp. 172-183). <https://doi.org/10.1002/9781118568170.ch21>

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2020). *Lista Roja de UICN*. <https://www.iucn.org/es/regiones/am%C3%A9rica-del-sur/nuestro-trabajo/pol%C3%ADticas-de-biodiversidad/lista-roja-de-uicn>

Vilela, T.; Harb, A. M.; Bruner, A.; da Silva Arruda, V. L.; Ribeiro, V.; Costa Alencar, A. A.; Escobedo Grandez, A. J.; Rojas, A.; Laina, A.; Botero, R. (2020). A better Amazon road network for people and the environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 117, n. 13, 7095–7102. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910853117>

Wilson, D. E.; Reeder, D. M. (2005). *Mammal Species of the World. A Taxonomic and Geographic Reference* (3.a ed., Vol. 1). Johns Hopkins University Press.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de especies atropelladas durante los recorridos en campo

Orden/Familia	Especie	UICN	Registros por tramo de estudio	
			Loboguerrero	Vía Antigua al Mar
Anfibios				
ANURA				
BUFONIDAE	<i>Rhinella marina</i>	LC	15	17
HYLIDAE	<i>Boana sp.</i>	-		1
Reptiles				
SERPENTES				
BOIDAE	<i>Boa constrictor</i>	LC	2	
COLUBRIDAE	<i>Atractus clarki</i>	LC		1
	<i>Erythrolamprus bizona</i>	LC		1
	<i>Erythrolamprus epinephelus</i>	LC	1	
	<i>Imantodes cenchoa</i>	LC		1
	<i>Leptophis ahaetulla</i>	DD		1
	<i>Oxyrhopus petola</i>	DD		2
	<i>Sibon nebulatus</i>	DD	3	4
ELAPIDAE	<i>Micrurus dumerilii</i>	DD		1
VIPERIDAE	<i>Bothrops atrox</i>	LC		1
SQUAMATA				
SQUAMATA	<i>Iguana iguana</i>	LC	3	1
Aves				
ACCIPITRIFORMES				
CATHARTIDAE	<i>Coragyps atratus</i>	LC	4	
FALCONIFORMES				
FALCONIDAE	<i>Milvago chimachima</i>	LC	1	

CAPRIMULGIFORMES				
CAPRIMULGIDAE	<i>Nyctidromus albicollis</i>	LC	2	
SULIFORMES				
PHALACROCORACIDA	<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	LC	2	
PICIFORMES				
RAMPHASTIDAE	<i>Pteroglossus torquatus</i>	LC	1	
PASSERIFORMES				
TYRANNIDAE	<i>Myiozetetes cayanensis</i>	LC	2	
THRAUPIDAE	<i>Thraupis episcopus</i>	LC		1
ICTERIDAE	<i>Molothrus bonariensis</i>	LC	2	
PASSERELLIDAE	<i>Arremon aurantirostris</i>	LC	1	1
Mamíferos				
DIDELPHIMORPHIA				
DIDELPHIDAE	<i>Didelphis marsupialis</i>	LC	31	4
	<i>Metachiurus nudicaudatus</i>	LC		1
CINGULATA				
DASYPODIDAE	<i>Cabassous centralis</i>	DD	1	
	<i>Dasypus novemcinctus</i>	LC	1	
LAGOMORPHA				
LEPORIDAE	<i>Sylvilagus brasiliensis</i>	LC	1	