

**Impactos ambientales de la infraestructura vial en el caribe colombiano, un análisis desde
la perspectiva regional**

Susana Paola Mendoza Navarro



Universidad de la Costa – CUC

Departamento de Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Civil

Barranquilla, Atlántico

2021

Impactos ambientales de la infraestructura vial en el caribe colombiano, un análisis desde la perspectiva regional

Susana Paola Mendoza Navarro

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:

Ingeniera Civil

Tutor:

César Antonio Cardona Almeida

Cotutor:

Fausto Canales Vega

Universidad de la Costa – CUC

Departamento de Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Civil

Barranquilla, Atlántico

2021

Resumen

La construcción de infraestructura vial produce impactos y/o variaciones en el medio ambiente. Ante la creciente infraestructura vial en la región Caribe colombiana, existen amenazas para el equilibrio de los sistemas que la conforman, de manera que, los servicios ecosistémicos presenten modificaciones en sus condiciones naturales. A pesar de las diversas herramientas administrativas disponibles en la legislación colombiana para identificar y mitigar los impactos ocasionados a los ecosistemas de los proyectos que se ejecutan, el panorama general actual muestra que el alcance de las medidas de compensación es limitado para los ecosistemas regionales interconectados. En este documento se expone un estudio de análisis de ocho casos de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) de proyectos viales en la región, así, se evalúa con criterios establecidos cuáles son las afectaciones que tienen mayor incidencia en una macro escala que actualmente no está evaluada por las herramientas de gestión disponibles. Para ello, se realizó una revisión de los aportes de la literatura científica e institucional, con el fin de identificar los problemas ambientales que se generan a gran escala con la interconexión de vías en el Caribe Colombiano, y que hoy en día no existe claridad de estos efectos a esta escala de estudio. En este documento se presentan recomendaciones desde una perspectiva de análisis integrado para proyectos futuros de tal forma se comprenden la alteración del paisaje y los sistemas de agua a escala regional.

Palabras clave: infraestructura vial, escala regional, fragmentación del paisaje, afectaciones a los ecosistemas

Abstract

The construction of road infrastructure produces impacts and/or variations in the environment. Given the growing road infrastructure in the Colombian Caribbean region, there are threats to the balance of the systems that make it up, so that the ecosystem services present modifications in their natural conditions. In spite of the various administrative tools available in Colombian legislation to identify and mitigate the impacts caused to ecosystems by the projects being executed, the current general panorama shows that the scope of compensation measures is limited for interconnected regional ecosystems. This document presents an analysis study of eight cases of Environmental Impact Assessments (EIA) of road projects in the region, thus, it evaluates with established criteria which are the effects that have the greatest impact on a macro scale that is not currently evaluated by the available management tools. For this purpose, a review of the contributions of scientific and institutional literature was carried out in order to identify the environmental problems that are generated on a large scale with the interconnection of roads in the Colombian Caribbean, and that today there is no clarity of these effects at this scale of study. This document presents recommendations from an integrated analysis perspective for future projects to understand the alteration of the landscape and water systems at a regional scale.

Keywords: Road infrastructure, regional scale, landscape fragmentation, ecosystem impacts.

Contenido

Lista de Tablas y Figuras.....	7
1. Introducción.....	9
2. Planteamiento del problema.....	12
Descripción del problema	12
Pregunta problema	14
3. Marco legal.....	14
4. Marco conceptual	18
Conectividad hidrológica	18
Conductividad hidráulica	19
Escorrentía superficial.....	19
Fragmentación del paisaje	19
Conectividad ecológica	19
Estudio de Impacto Ambiental.....	19
5. Metodología.....	20
Encuesta a expertos	22
Definición del área de estudio	23
Revisión de la literatura científica y normatividad colombiana	25
Casos de estudio en la Región Caribe (EIA).....	29
Matriz de evaluación y Criterios de evaluación	32
6. Resultados.....	33
Identificación de efectos generados por las obras viales en el caribe.....	34
Resultados de encuestas.....	36
Matriz Saaty	37
Análisis de herramientas de Gestión EIA, casos de estudio	40
7. Análisis de resultados de los EIA.....	46
Medidas de gestión estándar y obsoletas	46
Escala regional	48
Efectos acumulativos	48
Herramientas legales para los EIA	49
Limitaciones	50

8. Conclusiones..... 51

Referencias..... 54

• Anexos 62

Lista de Tablas y Figuras

Tablas

Tabla 1. Identificación de efectos en el agua superficial y subterránea. Tomado de: Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura- subsector vial; Error! Marcador no definido.	
Tabla 2. Búsquedas usadas en bases de datos. Autoría propia.	26
Tabla 3. Identificación de impactos en la literatura científica. Autoría propia.....	27
Tabla 4. Descripción de proyectos viales evaluados como casos de estudio en los en la Región Caribe. Autoría propia.	30
Tabla 5. Criterios de evaluación. Autoría propia.....	33
Tabla 6. Variables (afectaciones) evaluadas. Autoría propia.	38
Tabla 7. Ponderación de los resultados. Autoría propia.	38
Tabla 8. Prioridad de las afectaciones evaluadas. Autoría propia.	40
Tabla 9. Evaluación de las afectaciones en los estudios de impacto ambiental de proyectos viales en la Región Caribe. Autoría propia.	41

Lista de Figuras

Figura 1. Documentos necesarios para expedir una licencia ambiental. Autoría propia.....	15
Figura 2. Fases de un proyecto aplicado a infraestructura vial. Autoría propia.	17
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología implementada. Autoría propia.	21
Figura 4. Efectos causados por la infraestructura vial en el Caribe según los expertos. Autoría propia.	22
Figura 5. Localización del área de estudio. Autoría propia.	24

Figura 6. Localización de los casos de estudio. Autoría propia..... 30

Figura 7. Agrupación de las afectaciones. Autoría propia..... 35

Figura 8. Área de experticia de los expertos encuestados. Autoría propia. 36

Figura 9. Sector en donde se desempeñan los expertos encuestados. Autoría propia. 37

1. Introducción

La infraestructura vial genera múltiples beneficios económicos y sociales, proporcionando mejor conexión entre territorios y generando empleo en las comunidades, aun así, las vías también ocasionan efectos adversos en el entorno natural. Para el gobierno de Colombia, la ejecución de obras viales mejora la movilidad, la conexión territorial, de esta forma, se impulsa la productividad y disminuye la inequidad (Peláez Ponce, 2011). A pesar de ello, los problemas y/o impactos producidos en la naturaleza y el medio ambiente son significativos también, los cuales muchas veces no son considerados.

La construcción de una carretera impone una barrera lineal que interrumpe todo tipo de flujo en ambos lados del sitio de construcción. Esto, fragmenta el territorio y puede generar efectos de borde y barrera, de tal forma que se descontinúe la conectividad estructural (Arroyave Maya *et al.*, 2006), lo que a su vez trae consigo modificaciones en los flujos de materiales naturales, energía e información (Gurrutxaga, 2011). La pérdida de conectividad resulta en transformaciones significativas en el equilibrio, la estabilidad y la funcionalidad ecológica (Karlson, Mörtberg and Balfors, 2014; Pavlickova and Vyskupova, 2015; Reid *et al.*, 2015). Sin embargo, la pérdida de conectividad no debe abordarse únicamente desde el punto de vista de los ecosistemas terrestres o del paisaje, debido a que también provoca desconexiones en los sistemas (Saunders, Hobbs and Margules, 1999; Freeman, Pringle and Jackson, 2007a) de agua dulce (Langen *et al.*, 2012; Gutiérrez-C. and Pinilla-A., 2016; Jaramillo, Brown, *et al.*, 2018), ecosistemas marinos y costeros (Peña Racero, 2019).

En los últimos años en Colombia se ha invertido en la construcción de vías, donde, su desarrollo se ha concentrado principalmente en la región andina y el Caribe (Mintransporte,

2018). El país entre el 2010 y 2017 pasó de tener 718 km de autovía a 1.240 km, entre otras obras complementarias como Bypasses, Viaductos, entre otros (Mintransporte, 2018). Además, solo en 2018 se adjudicaron nueve proyectos de infraestructura vial en la región del Caribe, con una inversión superior a los 2.100 millones de dólares (Agencia Nacional de Infraestructura - ANI, 2018). No obstante, ante el crecimiento exponencial de obras viales en nuestro país, las normativas y herramientas de gestión disponible que tienen como fin la identificación y mitigación de los efectos ambientales no son fácilmente identificables y generan ambigüedad en los consultores (Soto, Suárez and Arrieta, 2018).

En la región Caribe ante el desarrollo de infraestructura vial y la variedad de condiciones bio-geográficas que existen, como son los páramos hasta los numerosos sistemas de humedales, entre los cuales podemos encontrar salitrales, manglares, estuarios, ciénagas y lagunas costeras, llanuras aluviales del río Magdalena, que proveen una amplia oferta de servicios ecosistémicos (Costanza *et al.*, 1997) generan presiones crecientes sobre los ecosistemas de la región, por ejemplo, las alteraciones de la estructura ecológica y la transformación del paisaje de sistemas cenagosos, a causa de las actividades económicas y el desarrollo de infraestructura en los municipios que los rodean (Jaramillo, Brown, *et al.*, 2018; Jaramillo, Licero, *et al.*, 2018), y como resultado de la construcción de obras viales (Jaramillo, Brown, *et al.*, 2018).

Es por esto, que este proyecto de grado tiene como objetivo analizar los impactos ambientales generados por el rápido crecimiento de la infraestructura vial en el Caribe Colombiano, relacionados con el ciclo hidrológico. Para ello, se hizo uso de encuestas que recolectara la opinión de expertos en áreas de biología, ecología, hidrología, hidráulica, gestión pública, ciencias ambientales situados en los sectores como academia e investigación,

institucional y consultores que dieran su percepción sobre la temática de la investigación. Lo cual orientó la búsqueda en bases de datos de la literatura científica y permitió agrupar las alteraciones generales con sus respectivos conceptos asociados a esta problemática desde el ámbito científico. Por último, a través de una evaluación a ocho (8) Estudios de Impacto Ambiental (EIA) de proyectos viales en la región se analizó y se valoró los impactos que estos consideraban, su respectiva evaluación y las medidas de mitigación dentro de sus ecosistemas.

En este documento, se describe el área y casos de estudio seleccionado para el mismo, además, de la metodología, la descripción de estrategias y criterios establecidos la evaluación de los expertos y el análisis de los EIA. En la sección de resultados se inicia con la presentación de las afectaciones identificadas, posteriormente se muestran las opiniones de los expertos y culmina con el análisis y discusión de los estudios de casos considerados para esta investigación y generar las respectivas conclusiones de esta revisión.

2. Planteamiento del problema

Descripción del problema

Los ecosistemas se alteran al existir variaciones en sus condiciones socio-ecológicas naturales y la biodiversidad de estos, las obras viales proporcionan modificaciones no solo en el territorio sino en la conectividad espacial existente (Gurrutxaga, 2011). Según (Arroyave Maya *et al.*, 2006) la fragmentación del territorio consiste en la división de un hábitat continuo en dos o más fragmentos asociados a la obstrucción del área por una carretera, canal, líneas de transmisión u otra obra de infraestructura, de manera que, permite generar efectos de borde y barreras, lo que conlleva a variaciones de las condiciones funcionales del sistema inicial. Los estudios que respaldan las modificaciones del balance ecológico son considerables. Por lo cual, se desencadenan discontinuidades en la conectividad, siendo el paisaje la estructura del terreno de mayores expresiones frágiles de condiciones naturales y la pérdida de la estabilidad ecológica (Pavlickova and Vyskupova, 2015). Estas revisiones apuntan a la pérdida de conectividad ecológica territorial, en la cual, el atropellamiento de especies, las variaciones de la ecología del paisaje, el efecto de borde y de barrera terrestre, son temáticas de interés dentro de las investigaciones.

La infraestructura vial en la región se combina con activas dinámicas socioeconómicas (Agencia Nacional de Infraestructura - ANI, 2018) y la mega diversidad de sus condiciones geográficas, climáticas y orográficas (Pérez *et al.*, 2017) lo cual favorecen al desarrollo de diversos ambientes naturales. En la Región Caribe se identifican 185 áreas prioritarias para conservar 24 tipos de ecosistemas entre los que se incluyen manglares, lagunas costeras dulces y saladas, pantanos, arrecifes de coral, praderas de pastos marinos, páramos, bosques húmedos de

alta montaña, bosques inundables, bosques secos tropicales, sabanas naturales y transformadas (Aldana-Domínguez, 2014).

Dada estas variedades de ecosistemas en esta región pueden generarse efectos diferenciados y propios en el balance natural del mismo. Diferentes casos que se han presentado en los últimos años y aún tienen repercusiones en los servicios ecosistémicos, son un claro ejemplo de las afectaciones no identificadas a larga escala y en tiempo. La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) es uno de ellos, donde, desde la construcción de la carretera Barranquilla - Ciénaga en 1956 hasta la actualidad, ha presentado una pérdida significativa de cobertura de bosque de manglar (Martinez, 2005) ; y la conectividad mar – ciénaga; entre el año 1956 al 2005 se ha reducido en un 48% (Espinosa *et al.*, 2005). Otro caso conocido, es el de la Ciénaga de La Virgen en Cartagena, donde la construcción de un anillo vial en el año 1988 ocasionó el taponamiento de todas las bocas de comunicación que la Ciénaga de la Virgen tenía con el Mar Caribe, produciendo cambios en el oxígeno disuelto, salinidad y la muerte de peces y del manglar (IAVH and PUJ, 2015). No obstante, la atención que se ha dado a los impactos derivados por la presencia de proyectos viales a través de investigaciones y publicaciones en Colombia y en la Región Caribe es escasa.

Ante la evidencia de estos casos que afectaron en gran medida los ecosistemas, esta investigación hace necesario recurrir a literatura científica, así como el marco legal colombiano, para poder entender las referencias actuales y medidas implementadas para contrarrestar estas problemáticas que causan repercusiones a los ecosistemas, específicamente los hídricos.

Pregunta problema

Esta investigación surge de la necesidad de analizar e indagar sobre las medidas actuales existentes en el territorio colombiano que buscan mitigar y evitar los impactos producidos por la construcción de obras civiles viales a los ecosistemas de la región Caribe.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la pregunta de investigación ¿Son suficientes las medidas de compensación actuales establecidas en las herramientas de gestión ambiental, así como hay claridad en el material científico sobre los efectos que generan las vías específicamente en los ecosistemas hídricos o acuáticos?

3. Marco legal

La legislación ambiental colombiana, históricamente, se remonta a los años 50 con la ley 2 de 1952, por la cual se dictaban normas sobre economía forestal y protección de los recursos naturales renovables. La constitución política de 1991 dio el marco para la nueva normatividad ambiental y solo hasta la ley 99 de 1993 se reglamentó el proceso de licenciamiento ambiental con el decreto 2041 del 2014. Actualmente en Colombia la legislación que regula la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables corresponde a la Ley 99 de 1993. En esta se organiza El Sistema Nacional Ambiental (SINA) y otras disposiciones legales para regular los ecosistemas del país. El SINA, es constituido por instituciones gubernamentales, autoridades ambientales e institutos de investigación, los cuales tienen la misión de definir instrumentos para la identificación, manejo y mitigación de los impactos ambientales en obras de infraestructura (Ley 99 de 1993 - EVA - Función Pública, n.d.). Se trata de diagnósticos ambientales de alternativas (DAA), estudios de impactos ambientales (EIA) y planes de manejo

ambiental (PMA), para la adquisición de las licencias ambientales (Soto, Suárez and Arrieta, 2018). Los EIA de un proyecto de infraestructura vial tiene como objetivo proporcionar las probables consecuencias ambientales y realizar las acciones necesarias para mitigar los impactos adversos (Ritter *et al.*, 2017).

Para el aspecto reglamentario, se revisó el conjunto de normas y leyes que regulan las medidas de manejo ambiental de los proyectos de infraestructura vial. Especialmente se buscó entender los mecanismos y procesos de licenciamiento ambiental en Colombia para estos, por lo cual se analizó: 1) Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental (EIA) en proyectos de construcción de carreteras y/o túneles. Resolución 0751 del 26 de marzo de 2015, 2) Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura vial de 2011, y 3) Manual de drenaje para carreteras de 2009. Estos se analizaron con el fin de identificar qué medidas de mitigación o acciones se hacen necesarias según las autoridades para cada una de las afectaciones en materia de estudio.

En Colombia, se presenta la siguiente jerarquía, concerniente a un proyecto de infraestructura vial.

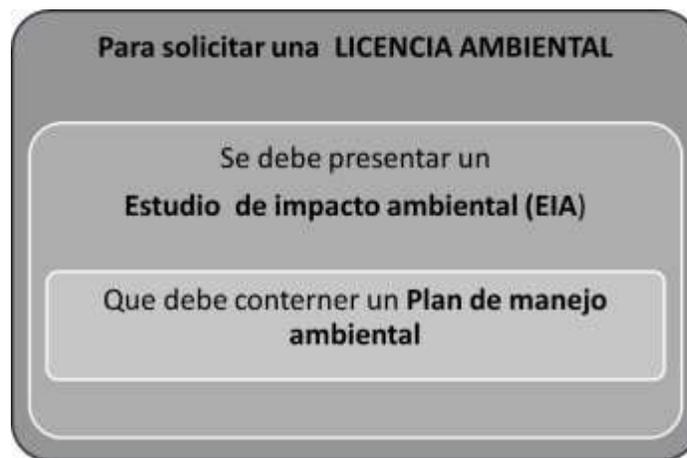


Figura 1. Documentos necesarios para expedir una licencia ambiental. Autoría propia

El decreto 1220 de abril del 2005, define *plan de manejo ambiental* como el conjunto detallado de medidas de cada una de las actividades a realizar en el proyecto, orientadas a: prevenir, mitigar, corregir y compensar impactos causados por el mismo.

En complemento, los *estudios de impacto ambiental* son los presentados ante la ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales) para que conceda la licencia ambiental y esto requiere que incluya la descripción, localización, alcance, zonificación ambiental, entre otros estudios relacionados.

Por último, este decreto define *licencia ambiental* como la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables, al medio ambiente o introducir modificaciones considerables al paisaje.

El Instituto nacional de vías (INVIAS) reglamenta un manual que controla el drenaje en este tipo de obra civil, llamado *Manual de drenaje para carreteras*, el cual también fue competencia de la presente investigación, este nos explica que, al momento de realizar el diseño de la vía, no sólo se debe limitar a escatimar gastos, sino también complementar con estudios hidrológicos, hidráulicos y socavación. El alcance anteriormente mencionado, se divide en 3 fases:

<p>Pre - factibilidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caracterización hidro climatológica de la zona, así como el inventario de las corrientes, delimitar cuencas y localización de estaciones.
<p>Factibilidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ubicación y prediseño de las alcantarillas, cota mínima de rasante en cada sitio de ponteadero, estudios de hidrología, hidráulica y socavación de cauces, conclusiones, recomendaciones y planos tipo de drenaje.
<p>Diseños definitivos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño de alcantarillas, separación máxima, cunetas, zanjas de coronación, aliviaderos y demás elementos de drenaje superficial y subterráneo que se requieran. En cuanto a la parte de los estudios de socavación se debe garantizar valores que aseguren la estabilidad de la vía proyectada.

Figura 2. Fases de un proyecto aplicado a infraestructura vial. Autoría propia.

En la *Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura- subsector vial*, se establecen y definen los impactos que podrían llegar a presentarse por la intervención o ejecución de una obra civil de este tipo. Es por esto, que en la Tabla 1 se identifican los alcances de los impactos, los cuales se pueden generar en las diferentes actividades constructivas.

Tabla 1.

Identificación de efectos en el agua superficial y subterránea. Tomado de: Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura- subsector vial

Elemento Ambiental	Impactos ambientales	Descripción del impacto
Agua Superficial	Cambios en la calidad del agua superficial.	Se refiere a las alteraciones en los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua superficial, que hace que sus propiedades cambien total o parcialmente.

	Alteración en la capacidad de transporte del agua	Se refiere a la acumulación de sedimentos en el cauce que no permite que el agua fluya normalmente.
	Alteración del cauce	Se refiere a los cambios que sufre la morfología del cauce debido a la extracción de materiales u otras actividades dentro de los cuerpos de agua.
Agua Subterránea	Alteración del nivel freático	Se refiere a las fluctuaciones que puede tener los niveles de agua.
	Alteración de la capacidad de acuíferos	Este impacto se refiere a los cambios que puede sufrir el volumen de agua del acuífero.
	Cambio en la calidad de agua de los acuíferos	Alteraciones en la calidad fisicoquímica y biológica del agua subterránea.
	Alteración en zonas de recarga hídricas	Se refiere a los daños que pueden sufrir las áreas de nacimiento de cuerpos de agua.

A su vez en el capítulo 6 de la guía en mención, se presentan las acciones que tenderán a minimizar, controlar, prevenir, mitigar y/o corregir los impactos, que se podrían causar por la ejecución de las obras. Así mismo, se establece que para las obras cercanas a cuerpos de agua se deben tomar las medidas necesarias para la protección y aislamiento de estas corrientes, para evitar el aporte de materiales.

4. Marco conceptual

Conectividad hidrológica

Hace referencia a el transporte de materia, energía y organismos por medio del agua dentro o entre elementos del ciclo hidrológico (Freeman, Pringle and Jackson, 2007a). Esto

se asocia con el movimiento de agua o sedimento que pasa por un punto en el paisaje (Bracken and Croke, 2007; Bracken *et al.*, 2013).

Conductividad hidráulica

Hace referencia a los intercambios con aguas subterráneas o la dinámica de los flujos están relacionados con la conexión y transferencia del flujo subterráneo por un medio poroso (Bracken *et al.*, 2013).

Escorrentía superficial

Los flujos cambian artificialmente, así como los regímenes de humedad a escalas del sitio, y como consecuencia las carreteras desvían y concentran los flujos naturales, impulsando nuevas formaciones de canales (Raiter *et al.*, 2018).

Fragmentación del paisaje

Consiste en la pérdida de conectividad ecológica correspondiente al fraccionamiento y las discontinuidades que se generan por barreras que dividen el área inicial en zonas más pequeñas, cambiando las condiciones funcionales o estructurales de cada sistema (Gurrutxaga, 2011).

Conectividad ecológica

Relaciona a los ecosistemas de agua dulce que presentan movimientos de agua, que lleva consigo sedimentos, que con el pasar del tiempo pueden presentar alteraciones y efectos perjudiciales en las características naturales del mismo como la salinización (Entrekin *et al.*, 2019).

Estudio de Impacto Ambiental

Es el instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental y se exigirá en todos los casos en que se requiera.

Este estudio deberá corresponder en su contenido y profundidad a las características y entorno del proyecto, obra o actividad (ANLA).

5. Metodología

Esta investigación tiene sus inicios en el marco del Seminario Taller Internacional sobre Hidrología Urbana y Desarrollo: Retos y Oportunidades en el Caribe, el cual tuvo lugar en Barranquilla en el año 2018. En este evento se realizó una encuesta a 45 expertos, entre autoridades locales, gestión pública y expertos en ciencias ambientales del sector académico, institucional y consultivo entre autoridades locales, gestores públicos y expertos en ciencias ambientales de la academia. Las respuestas involucraron una amplia gama de problemas donde los ecosistemas de agua dulce, la conectividad ecológica y los efectos ocultos a gran escala eran centrales. Estos expertos respondieron, las preguntas: ¿Cuáles son los retos ambientales del desarrollo de la infraestructura en el departamento del Atlántico, Colombia? y ¿Cuáles son los principales efectos del rápido crecimiento de la infraestructura vial en el Caribe colombiano?, en ambos casos, las respuestas implicaban una amplia gama de problemas en los que los ecosistemas de agua dulce, la conectividad ecológica y los efectos ocultos a gran escala eran fundamentales.

La metodología diseñada para confirmar y alertar sobre la opinión de los expertos fue la siguiente: Se recopiló la información dada por los expertos de manera inicial, de esta forma se realizó una lluvia de ideas de todos los impactos/efectos causados por la infraestructura vial a los ecosistemas de la región. Posterior a ello, se identificó mediante una revisión en la literatura científica, cuáles de esos efectos tenían mayor relevancia según la comunidad científica, para ello se hizo uso de bases de datos. Así, con esta información se confrontó con las herramientas

de análisis/gestión disponible en toda la región de manera aplicada a ocho casos de estudios de proyectos viales.

La estrategia adoptada fue la agrupación en categorías, los impactos/efectos identificados de un conjunto vasto y variado a un grupo más reducido, se pudo realizar un análisis completo o una comparación entre ellos, aplicando el conocimiento encontrado a estudios de impacto ambiental de proyectos viales y su respectiva evaluación en casos de estudio específicamente en el caribe colombiano.

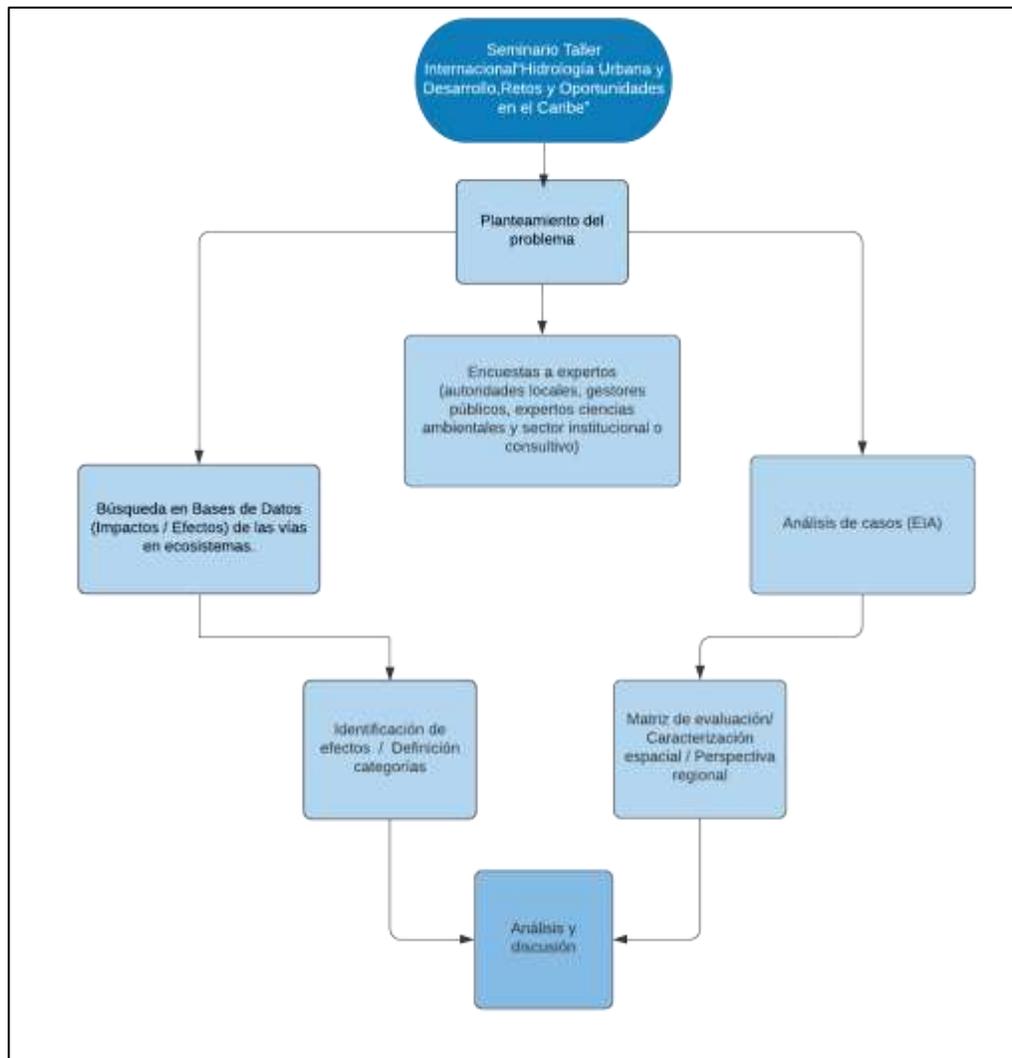


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología implementada. Autoría propia.

Encuesta a expertos

Con la información inicial recolectada se identificaron las afectaciones que podían ocasionarse al ecosistema por la infraestructura vial desarrollado en el seminario taller. Para sinterizar estos datos, se construyó una nube de palabras, la cual se presenta en el gráfico 4.



Figura 4. Efectos causados por la infraestructura vial en el Caribe según los expertos. Autoría propia.

En la nube de palabras (gráfico 4) el tamaño de las afectaciones representa la repetición o importancia de estos, además, permite apreciar la diversidad de impacto. Los efectos más significativos correspondieron a la pérdida de la biodiversidad, alteración en la capacidad de los acuíferos, modificación del nivel freático, cambios en la capacidad de infiltración, problemas asociados a la sedimentación y variación en la conectividad hídrica. Posterior a esto, se realizó una segunda encuesta más estructurada a 37 expertos, en la cual cada uno de ellos calificó con una valoración que afectación creían más significativa con relación a otra, lo cual se presenta en

la Tabla 7. Esta encuesta se basó en comparar las 3 afectaciones/ alteraciones identificadas y agrupadas con anterioridad en el Seminario Taller bajo el título de la Fragmentación Hídrica a causa de una infraestructura vial. Las variables evaluadas fueron conectividad hídrica, escorrentía de aguas superficiales y flujo de aguas subterráneas al tener como base un análisis de los ecosistemas acuáticos.

El análisis de las respuestas se realizó bajo el método del análisis AHP o matriz Saaty, el cual consiste en una representación de los juicios de valor para la comparación entre dos alternativas respecto a un criterio dado, de esta manera, se establece la importancia o preferencia de las alternativas. Para este caso, determinar que afectación o efectos en la Región Caribe tiene mayor influencia según las condiciones propias de la misma.

Para ello, se construyó un formulario utilizando la herramienta Microsoft Forms, este se distribuyó a través de correos electrónicos y redes sociales de universidades, centros de investigación y redes de conocimiento nacional. En la elaboración de esta encuesta se contrastaron las tres hipótesis principales subdivididas y agrupadas. Para la escogencia de los expertos se realizaron búsquedas de perfiles en áreas de experiencia como biología, ecología, hidrología, hidráulica, gestión pública, ciencias ambientales situados en los sectores como academia e investigación, institucional y consultores que dieran su percepción en la temática.

Definición del área de estudio

El Caribe Colombiano es la región natural continental más septentrional de Colombia y Suramérica con una superficie terrestre de 132244 km² representa el 11.6% del territorio continental colombiano (Meisel-Roca and Pérez-Valbuena, 2008). El área de estudio de esta investigación está limitada a los departamentos de la región caribe colombiana (Ilustración 1).



Figura 5. Localización del área de estudio. Autoría propia.

La región está dominada por la llanura continental del Caribe con elevaciones máximas de 500 msnm (L. Mesa-S, no date) y enmarcada por las estribaciones de las cordilleras andinas al sur y oriente y el mar Caribe al norte y occidente. Destaca en la región la presencia de la Sierra Nevada de Santa Marta con picos nevados que alcanzan los 5775 m de elevación a menos de 50 km lineales de la costa. La región Caribe comprende parte de la cuenca baja del río Magdalena, e incluye áreas de drenaje de los ríos Cauca, Catatumbo, Atrato y Sinú, además de numerosos afluentes directos que desembocan en el mar (IDEAM, 2013). Se trata de cuencas jóvenes de formación en el Terciario con nutrida afluencia sedimentaria y una dinámica geomorfología activa (Rangel-Buitrago and Posada-Posada, 2005; Restrepo, 2014). La región hidrográfica del caribe cuenta con un 25% en los cuerpos de agua (IDEAM, 2015) y el 82% de las ciénagas a nivel nacional (Meisel-Roca and Pérez-Valbuena, 2008).

Los ecosistemas de la región se pueden agrupar en tres grandes conjuntos: terrestres, acuáticos marinos y acuáticos continental (Pérez *et al.*, 2017). Las ciénagas, como conjunto de ecosistemas de humedales juegan un papel importante en la producción y el mantenimiento de la biodiversidad y del recurso hídrico; participan en la regulación del flujo de agua y energía, la amortiguación, estabilización y recarga de los ríos, la regulación del clima y la humedad en la región (L. Mesa-S, no date). Dentro de las funciones estratégicas que le corresponden a los ecosistemas de la región, podemos encontrar el proporcionar servicios ecosistémicos como suministro de agua, recursos pesqueros, flujo de nutrientes a los ecosistemas marinos, regulación del recurso hídrico y del clima, captura de carbono, producción de oxígeno, barreras de protección del litoral contra la erosión costera, hábitat de especies migratorias y residentes, así como el control de sedimentos, entre otros (Fundación Alma and Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2013). Esos servicios favorecen de manera directa al 20,43% (9,86 millones de habitantes) de la población de Colombia, que habita esta región (DANE, 2019).

Revisión de la literatura científica y normatividad colombiana

Para contrastar el conocimiento sobre las afectaciones causadas por la infraestructura vial mencionada por los expertos, se realizaron búsquedas en la literatura científica, así como en la legislación y normativa colombiana. En el primer caso, se usaron las bases de datos Scopus y Web of Science, a partir de palabras claves alrededor de los términos “Highway” and “Road” y filtros temporales, espaciales y disciplinares orientados a indagar sobre las afectaciones identificadas, teniendo como eje principal las afectaciones valoradas por los expertos. Estas búsquedas se resumen en la Tabla 2 y se pueden visualizar con los filtros utilizados en los anexos de este documento en la Tabla 10.

Se revisaron 39 artículos de un total de 681 documentos encontrados según las ecuaciones de búsqueda presentadas en la Tabla 10 en anexos, donde, inicialmente se enfocó en indagar sobre las 3 afectaciones aplicadas al ciclo hidrológico del conglomerado de las encuestas, sin embargo, se obtuvo otra información relevante que se describirá en el ítem 7.1. Cabe recalcar que, de los artículos encontrados en las bases de datos mencionadas, solamente 6 artículos trataban temas en Colombia, de los cuales 5 se enmarcaban en la región Caribe, por lo cual se puede mencionar que los estudios en nuestro país y en la región en la temática son escasos.

Tabla 2.

Búsquedas usadas en bases de datos. Autoría propia.

TEMÁTICA / HIPÓTESIS ANALIZADA	ARTICULOS ENCONTRADOS	ARTÍCULOS ANALIZADOS
Fragmentación	249	11
Alteración flujos de agua subterránea / Conectividad hidráulica	49	4
Capacidad de infiltración	34	2
Agua de escorrentía	43	0
Conectividad hidrológica / Agua	66	7
Alteración salinidad cuerpos de agua dulce	42	3

TOTAL	483	27
--------------	-----	----

Fuente propia del autor

Previamente a esta búsqueda específica, se realizó una búsqueda preliminar relacionada con los términos Medio ambiente y Efectos / Infraestructura vial, obteniendo un resultado de 198 documentos, de los cuales se analizaron 12.

Al obtener la información científica se hizo necesario comparar las recomendaciones dadas por las herramientas reglamentarias en Colombia. Para ello, se revisaron los documentos mencionados en el capítulo 4, con el fin de conocer si la información existente en las bases de datos era justificada en estas herramientas. Esto permitió confrontar cuáles eran las medidas o acciones que establecían la comunidad científica en comparación con las de las herramientas de gestión disponible.

En la tabla 3 se exponen las causas y consecuencias de las afectaciones en el componente hídrico, por medio de esta revisión, se resalta que la afectación que tiene más información y sustentación a nivel científico corresponde a alteración de la conectividad hídrica.

Tabla 3.

Identificación de impactos en la literatura científica. Autoría propia.

HIPÓTESIS	DESCRIPCIÓN	CAUSAS ESPECÍFICAS	CONSECUENCIAS	ESTUDIOS
AFECTACIONES DE LA CONECTIVIDAD HÍDRICA	Afectación a las conexiones naturales entre cuerpos de agua superficial. Altera los intercambios regulares de flujo de agua que mantiene ciertas características propias de cada uno.	Se divide el área con una obra de infraestructura y se evidencia una alteración del balance hídrico natural	Cambios en patrones reproductivos de especies asociado a las variaciones de los niveles de caudales y alteraciones de la cadena alimenticia	Efectos de la conectividad local sobre los ensambles de peces en una planicie de inundación trópica

			Disminución de la regulación hídrica debido a la variación de la capa vegetal	Análisis de conectividad espacial y fragmentación de la Ciénaga Grande de Santa Marta
			Alteración del balance hídrico de cuerpos de agua	Effects of hydroclimatic change and rehabilitation activities on salinity and mangroves in the Ciénaga gde Santa Marta, Colombia.
			Mortandad de peces	Effects of Hydroclimatic Change and Rehabilitation Activities. Wetlands, 38, 755
			Alteración de caudales resultado de eventos de lluvias	Simulation of the hydraulic performance of highway filter drains through laboratory models and stormwater management tools
AFECTACIONES DE LA ESCORRENTÍA DE AGUAS SUPERFICIALES	Afectación, ya sea en dirección, cantidad o temporalidad del flujo natural en superficie que debería seguir el agua proveniente de lluvias. Se incluyen modificaciones temporales o permanentes del cauce de las corrientes de agua.	Movimientos de tierra debido a la remoción de la capa vegetal	Efectos de erosión y agradación en cuerpos de agua, debido a las alteraciones del régimen de corrientes	Hydrologic Performance of a Transitioned Infiltration Basin Managing Highway Runoff
			Intensificación de regímenes hidráulicos asociados a desastres como inundación y sequia	
AFECTACIONES EN EL FLUJO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	Implica el cambio en el curso natural del agua subterránea, la modificación de condiciones de infiltración de los suelos y a los intercambios con agua superficial.	Alteración de la compactación natural del terreno	Alteración de los intercambios de cuerpos de agua subterránea y superficial	Application of permeable pavements in highways for stormwater runoff management and pollution prevention:

Alteración capacidad de acuíferos	California research experiences
Alteración de nivel freático	
Alteración de la capacidad de infiltración	Infiltration capacity of roadside filter strips with non-uniform overland Flow

Fuente propia del autor

Casos de estudio en la Región Caribe (EIA)

Para los casos de estudio a evaluar, se consultó en los expedientes disponibles en los centros de documentación en línea de las Autoridades Ambientales Regionales del Caribe, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI). Dadas las condiciones sanitarias en 2020 no fue posible acceder a los expedientes físicos. El primer criterio de selección fue un marco temporal de los últimos cinco años, para tener un marco normativo uniforme y actualizado. El segundo fue contar con casos de cada departamento de la región Caribe colombiana, para representar mejor la visión regional y la diversidad del ecosistema. Se seleccionaron un total de ocho (8) expedientes de licencias ambientales otorgadas a proyectos viales para el análisis. La localización y descripción de los proyectos considerados puede verse en la Ilustración 2 y la Tabla 3 respectivamente.

Estos proyectos engloban la construcción de tramos de carretera o circunvalaciones entre 2015 y 2017, con una longitud que oscila entre los 5,3 km y los 20,16 km. Los proyectos de carreteras enumerados en la tabla como 1, 2, 3 y 8 están localizados en entornos marinos y costeros o de humedales de agua dulce. Por otro lado, los proyectos de carreteras enumerados como 4, 5 y 7 se localizan en entornos de bosque seco tropical. A diferencia de los casos

anteriores, el proyecto 6 se encuentra en ambos ecosistemas. En la tabla 2 se presenta las características como la ubicación, áreas de influencias, estructura ecológica principal y principal impacto con su respectiva medida de mitigación de los proyectos analizados.



Figura 6. Localización de los casos de estudio. Autoría propia.

Tabla 4.

Descripción de proyectos viales evaluados como casos de estudio en los en la Región Caribe. Autoría propia.

	PROYECTO VIAL	MUNICIPIO/ DEPARTAMENTO	ÁREA DE INFLUENCIA	ESTRUCTURA ECOLÓGICA PRINCIPAL	PRINCIPAL IMPACTO/ MEDIDA DE MITIGACIÓN
1	CONCESIÓN RUTA AL MAR	Santa Cruz de Loricá / Córdoba	<ul style="list-style-type: none"> • Físico-biótico: 3291.64 ha. • Microcuenca del Arroyo Arena, parte del Arroyo Hondo y dos cursos de agua del cual no se identifica toponimia. • Socioeconómico: 5669.80 ha. 	Complejo dinámico de comunidades vegetales y animales del complejo cenagoso	*El componente más afectado corresponde al medio socioeconómico.

	S.A.S. Variante Lórica		<ul style="list-style-type: none"> Veredas: El Esfuerzo, centros de afluencia (Barrio La Esmeralda), corregimiento San Sebastián y casco urbano del Municipio de Lórica. 	del Río Sinú. (agua dulce)	*En cuanto a severidad, afectación de ecosistemas acuáticos.
2	CONCESIÓN RUTA DEL SOL II variante vial doble calzada troncal del Caribe	Tasajera- Ciénaga/ Magdalena	<ul style="list-style-type: none"> Físico-biótico: El espejo de agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta y la plataforma costero-lacustre Socioeconómico-cultural: Tasajera, Palmira, e Isla del Rosario (municipio de Pueblo Viejo), corregimiento de Nueva Frontera, Ciénaga 	<p>*Costero-lacustre y la plataforma costero-marina, así como la presencia de los cuerpos de agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta, el mar Caribe, y criterios bióticos como las áreas de las coberturas naturales.</p> <p>*Bosque denso bajo inundable (manglar)</p>	<p>*Contaminación del agua</p> <p>*Modificación de los cursos de las corrientes de agua</p> <p>*Cambio en la disponibilidad de aguas subterráneas</p> <p>* Problemas asociado a la sedimentación</p> <p>*Cambio en la cobertura vegetal.</p>
3	CONCESIÓN RUTA AL MAR S.A.S Tramo 7.3 Tolú- Pita abajo- El pueblito	Santiago de Tolú/Sucre	<ul style="list-style-type: none"> Abiótico- Biótico: Microcuencas del Arroyo La Perdíz, Arroyo Pechelín, Arroyo Pita y Arroyo Tumba Frailes. Socioeconómico-cultural: Corregimientos de Pita Bajo, Pita en Medio y Pita Arriba. 	Llanura costera aluvial del Golfo de Morrosquillo	<p>*Alteración cobertura vegetal</p> <p>*Atropellamiento de fauna silvestre</p> <p>*Alteración ecosistemas acuáticos y terrestres</p> <p>*Contaminación cuerpos de agua</p> <p>*Factores socioeconómicos positivos y negativos</p>
4	CONCESIÓN CARTAGENA-BARRANQUILLA Y CIRCUNVALAR DE LA PROSPERIDAD (UNIDAD FUNCIONAL 6)	Galapa-Barranquilla / Atlántico	<ul style="list-style-type: none"> Abiótico- Biótico: Cuenca de la Ciénaga de mallorquín y Rio magdalena Socioeconómico-cultural: Municipios de Galapa y Puerto Colombia. 	Bosque Seco tropical. Sólo el 15.5% del AID son coberturas naturales (manglar, vegetación secundaria y herbazal), el resto son áreas antropizadas.	<p>*Desplazamiento de la población</p> <p>*Afectación del ecosistema</p>
5	CONSTRUCCIÓN DE LA VARIANTE EN EL MUNICIPIO EL CARMEN DE BOLÍVAR, DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR	El Carmen de Bolívar / Bolívar	<ul style="list-style-type: none"> Abiótico: Subzona hidrográfica del Río Magdalena entre Plato y Calamar (Área hidrográfica del Magdalena-Cauca). Zonobioma seco tropical del Caribe. Socioeconómico: Vereda Miramar, Vereda Kilómetro 1, Barrio Nariño, Vereda La Cesta. 	Bosque Seco tropical	<p>*Alteración de ecosistema de Hábitats</p> <p>*Contaminación Hídrica por aporte de residuos líquidos.</p>
6	CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA VIA BIDIRECCIONAL (VARIANTE) ENTRE EL MUNICIPIO DE SAN DIEGO Y LA VIA LA PAZ VALLEDUPAR.	San Diego, Valledupar, La Paz / Departamento de Cesar	<ul style="list-style-type: none"> Físico-biótico: Muestra mapa con cuerpos de agua, NO DEFINE UNO EN ESPECÍFICO Socioeconómico: Municipio de Valledupar, Vereda Las Casitas, y Corregimientos: Los Tupes, Varas Blancas y las Pitillas. 	Ecosistema Bosque Seco Tropical – Bosques de galería y ripiario, arbustal abierto, Arbustal abierto esclerófilo, Vegetación secundaria alta, Vegetación secundaria baja, Zonas arenosas naturales, Ríos (50 m) Y Lagunas, lagos y ciénagas naturales	<p>*Cambio de la calidad paisajística.</p> <p>*Modificación de hábitats de la fauna.</p>
7	CONCESIÓN VIAL RUTA CARIBE TRAMO 5-6	Bayunca- Sabanalarga, Atlántico	<ul style="list-style-type: none"> NO APARECE 	Bosque Seco tropical	<p>*Generación de conflictos con las comunidades.</p> <p>*Afectaciones áreas sensible ambientales</p>

8	CONCESIÓN RUTA AL MAR S.A.S Variante San Carlos	San Carlos / Córdoba	<ul style="list-style-type: none"> ● Abiótico: Divisoria de agua del cerro Colosina, cuenca de Arroyo Grande. ● Socioeconómico: Veredas: Cabuya, Coroza Bajo y Arroyo Grande. Barrios: Remedía pobre y Porvenir. 	Complejo de Ciénagas (Ciénaga de Los Quemados, Ciénaga de Charco Grande, Ciénaga Martinica, Ciénaga Larga) (Áreas de importancia ecológica)	*Cambio en la movilidad peatonal y de semoviente. *Traslado de población. *Afectación de Bosques.
---	---	----------------------	--	--	---

Fuente propia del autor

Matriz de evaluación y criterios de evaluación

Los casos de estudio se valoraron en una escala de uno a cuatro, donde uno (1, rojo) no menciona ningún impacto relacionado con la afectación sistémica; dos (2, naranja) mencionan al menos un impacto relacionado con la afectación sistémica, pero no define medidas de mitigación para los mismos; tres (3, amarillo) mencionan impactos relacionados con la afectación sistémica y define medidas de mitigación de estos en el área de influencia directa y/o indirecta del proyecto; no presenta, menciona o plantea estrategias claras para manejo de efectos a escala regional y cuatro (4, verde) trata impactos y medidas de manejo relacionados con la afectación sistémica en el área de influencia directa y/o indirecta del proyecto y también presenta o discute de manera clara medidas o estrategias para manejo de efectos a la escala regional.

Tabla 5.

Criterios de evaluación. Autoría propia.

<p>No menciona ningún impacto relacionado con la afectación</p>	<p>Menciona al menos un impacto relacionado con la afectación, pero no define medidas de mitigación para los mismos.</p>	<p>Menciona impactos relacionados con la afectación, también define medidas de mitigación de estos en el área de influencia directa y/o indirecta del proyecto. No presenta, menciona o plantea estrategias claras para manejo de efectos a escala regional.</p>	<p>Menciona impactos relacionados con la afectación, también define medidas de mitigación de estos en el área de influencia directa y/o indirecta del proyecto. Presenta o discute de manera clara medidas o estrategias para manejo de efectos a la escala regional.</p>
<p>1</p>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>4</p>

6. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la revisión y comparación de los casos de estudio. Inicialmente al realizar la revisión de los documentos elegidos de las bases de datos y la encuesta a expertos. Esto permitió determinar las afectaciones que se iban a evaluar en cada uno de los casos de estudio con los criterios de evaluación descritos en la metodología. A continuación, se muestra una matriz de investigación realizada en bases de datos, también la caracterización y categorización de los impactos más destacados. Así mismo, se explica los

resultados de las encuestas, junto con el análisis del método del Análisis AHP o matriz Saaty y, por último, se muestra el análisis y discusión de los hallazgos obtenidos de los ocho estudios de casos.

Identificación de efectos generados por las obras viales en el caribe

La categorización de los impactos/efectos ambientales se basó en un simple ejercicio de asociación realizado en el taller de expertos. El resultado mostró cuatro categorías: conectividad hidrológica, drenaje superficial, flujo subterráneo y conectividad ecológica/terrestre. Un factor de "importancia" construido mostró las categorías primera y cuarta como las más relevantes para los expertos participantes. Aunque en la encuesta realizada a los expertos se evaluaron 3 grupos de afectaciones: conectividad hídrica, escorrentía de aguas superficiales y flujo de aguas subterráneas, después de la revisión en la literatura se demuestra otras alteraciones más generales con los servicios ecosistémicos que también generan efectos en las propias del ciclo del agua. Por lo cual, se determina establecer cinco categorías de estudio.

En el gráfico 4, se muestra un resumen de las categorías, denominadas en los sucesivos impactos o afectaciones sistémicos, que se explican a continuación.

(1) La conectividad hidrológica agrupa todos aquellos efectos resultantes de interferir en las conexiones naturales entre las masas de agua superficiales; (2) las afectaciones al drenaje superficial implican todos los cambios en la dirección, cantidad o temporalidad del curso natural del agua de lluvia que corre por la superficie -también se incluyeron las modificaciones temporales o permanentes de las corrientes de agua- (3) el flujo subterráneo o conductividad hidráulica se refiere a aquellos efectos sobre el flujo natural de las aguas subterráneas, la modificación de las condiciones de infiltración del suelo, la recarga de los acuíferos y el intercambio con las aguas

superficiales; (4) la conectividad ecológica se refiere a los cambios en los aspectos funcionales o estructurales del ecosistema, tanto de agua dulce como terrestre; por último, (5) la fragmentación del paisaje engloba todos los cambios y resultados del establecimiento de barreras físicas en forma de obras de carretera y también, las transformaciones que permite una carretera de acceso, por ejemplo, un área natural que se convierte en una zona de producción agrícola o turística por la facilidad de transporte.

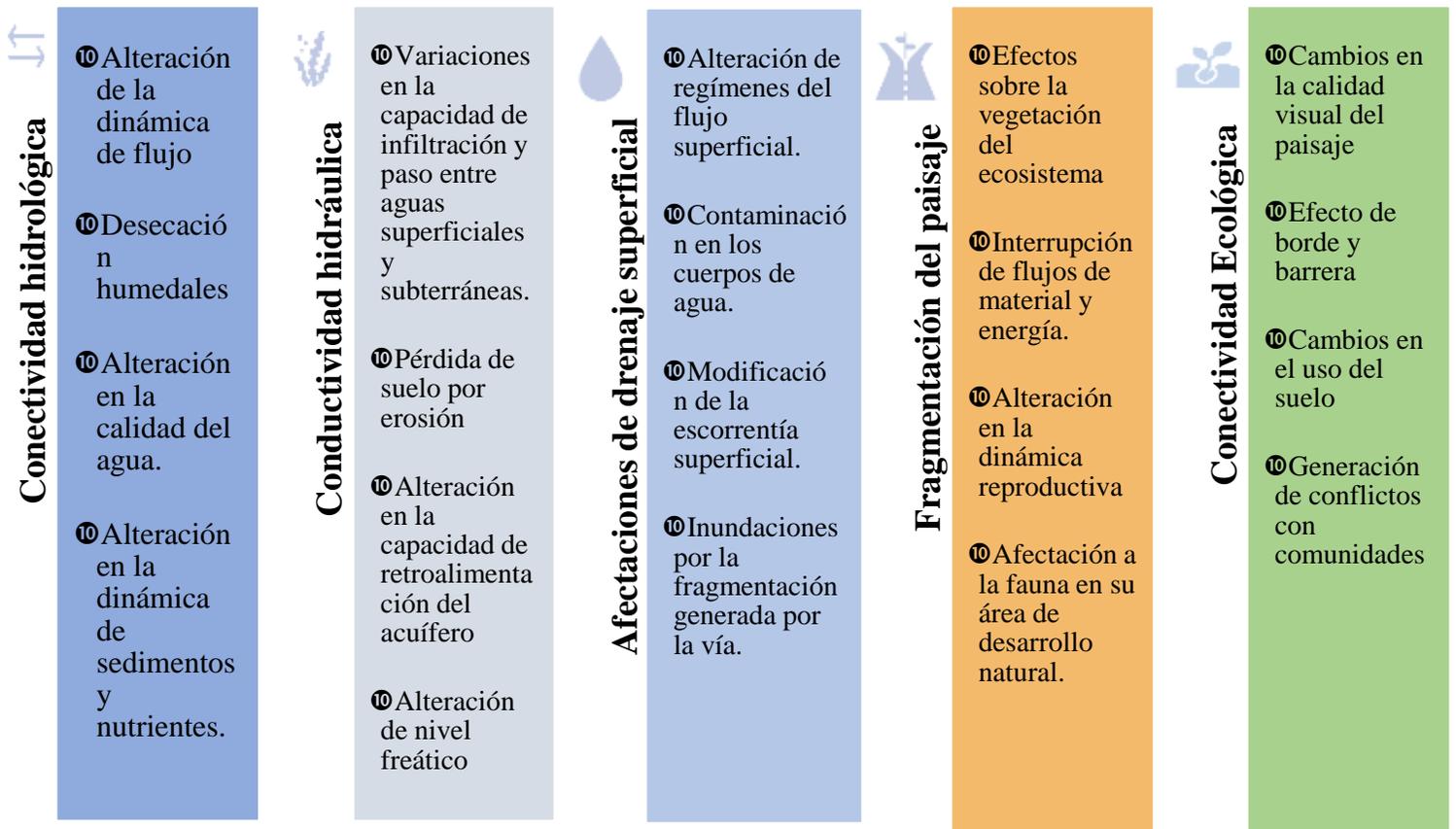


Figura 7. Agrupación de las afectaciones. Autoría propia.

Resultados de encuestas

La caracterización realizada a los expertos correspondió a una muestra de 37 encuestados, a quienes se les pidió valorar el nivel importancia entre las afectaciones que se muestran en la tabla 6. De este modo, cada uno dio su juicio de valor con relación a su experiencia y conocimiento. En los gráficos 5 y 6 se muestran los datos que relacionan el área de experiencia y el sector de trabajo de los encuestados. Esta información establece que el sector al que se encuentra dedicado los expertos corresponde a una mayor presencia a la academia e investigación y también la variedad de áreas de experticia, lo cual da una visión mas general de lo que puede pasar en la región ante esta problemática.

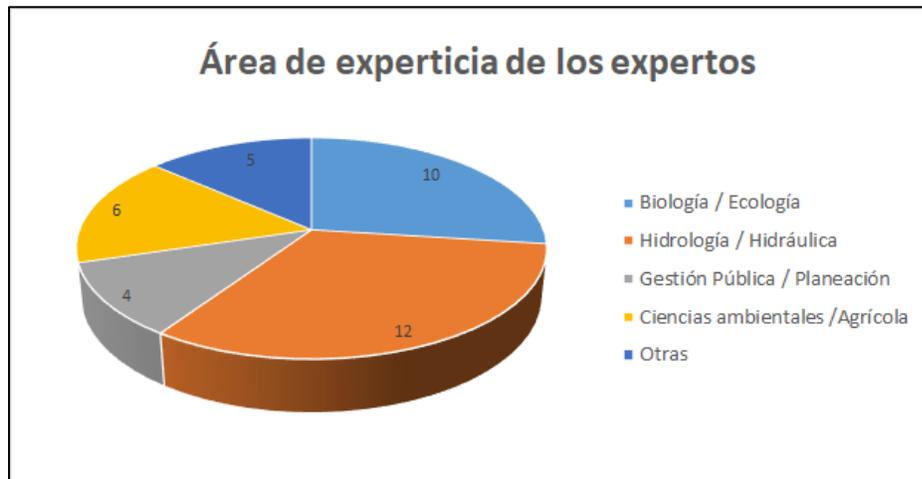


Figura 8. Área de experticia de los expertos encuestados. Autoría propia.



Figura 9. Sector en donde se desempeñan los expertos encuestados. Autoría propia.

Matriz Saaty

La valoración realizada bajo el método del Análisis AHP o matriz Saaty, consiste en una representación de los juicios de valor para la comparación entre dos alternativas respecto a un criterio dado, de esta manera, se establece la importancia o preferencia de alternativas en la matriz de comparaciones. El Analytic Hierarchy Process (AHP) determina la relevancia concerniente a cada apreciación, este método utiliza una escala de 1 a 9, donde, la menor puntuación evalúa que dos elementos contribuyen igualmente en la valoración y el último instituye que un criterio domina al otro representativamente (Khan *et al.*, 2019; Mendoza *et al.*, 2019).

En este estudio se utilizó este método bajo la inquietud que correspondía a determinar qué afectación o efectos en la región Caribe colombiana tiene mayor influencia e importancia a nivel hídrico cuando el área se veía interrumpido con una obra de infraestructura vial. En la Tabla 6 se muestran las afectaciones evaluadas.

Tabla 6.

Variables (afectaciones) evaluadas. Autoría propia.

1	AFECTACIONES A LA CONECTIVIDAD HÍDRICA
2	AFECTACIONES DE LA ESCORRENTÍA DE AGUAS SUPERFICIALES
3	AFECTACIONES EN EL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Fuente propia del autor

De acuerdo con las especificaciones del método AHP se realizó una ponderación de los resultados, de este modo, se puede determinar la puntuación global para las tres afectaciones. Inicialmente el conglomerado arroja el resultado en la Tabla 7, donde se presenta la comparación entre las variables estudiadas y su respectiva calificación.

Tabla 7.

Ponderación de los resultados. Autoría propia.

Comparison	AHP priorities		How much more?
1	AFECTACIONES A LA CONECTIVIDAD HÍDRICA	AFECTACIONES EN EL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	4

2	AFECTACIONES A LA CONECTIVIDAD HÍDRICA	AFECTACIONES DE LA ESCORRENTÍA DE AGUAS SUPERFICIALES	7
3	AFECTACIONES DE LA ESCORRENTÍA DE AGUAS SUPERFICIALES	AFECTACIONES EN EL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	4

Fuente propia del autor

En la Tabla 7 se implementa el método Saaty bajo la ponderación de los resultados de los expertos, arrojando la prioridad de estas afectaciones, considerando una matriz de 3 x 3. La afectación que los expertos consideran que genera mayor impacto en la región, corresponden a la Alteración de la Conectividad hídrica con un valor del 69%, en segundo lugar, se puntúa a la Alteración de la escorrentía del agua superficial con un 23 % y por último la alteración del flujo de aguas subterráneas con un 8 %. Esto significa que para la mayoría de los expertos encuestados coinciden en sus apreciaciones, destacando que en un 69%, la afectación más representativa o impactante en comparación con las demás corresponde a la conectividad hídrica. Este resultado evidencia que ante la gran presencia de cuerpos hídricos en la región y la variedad de los servicios ecosistémicos, uno de los factores que deben considerarse involucra la interrupción en algún punto la comunicación natural de cuerpos de agua al construir obras viales, lo cual podría generar catástrofe ambientales como ya ha ocurrido en el tiempo.

A pesar de ser la conectividad hídrica la afectación con mayor ponderación obtenida por los expertos y justificada por la literatura científica, en la legislación colombiana no existe unas medidas de mitigación claras para manejar estos los impactos.

Tabla 8.*Prioridad de las afectaciones evaluadas. Autoría propia.*

	1	2	3	Eigenvector	Priorities %
1	1	4	7	0,7	69%
2	0,25	1	4	0,2	23%
3	0,14	0,25	1	0,1	8%

Fuente propia del autor

Análisis de herramientas de Gestión EIA, casos de estudio

Los EIA de los ocho casos de estudio se enfocaron en describir y plantear alternativas de manejo para los impactos generados durante el proceso de la construcción, pero la identificación, valoración o medidas de manejo de impactos o efectos posteriores, es decir durante la vida útil de la vía, no fueron ampliamente considerados en los estudios. En la tabla 3 se describen algunos de los impactos y medidas de manejo más notorios de cada caso, descrito en su respectivo EIA, los cuales varían desde afectaciones socioeconómicas, pasando por atropellamiento de fauna silvestre, contaminación de cuerpos de agua y muy comúnmente mencionada la afectación de la cobertura vegetal. Es importante mencionar que en los casos de estudio no se hace ninguna mención o uso de estudios de impacto, planes de manejo o medidas de manejo ambiental de proyectos de construcción de vías contiguas o vecinas.

Haciendo uso de los criterios de evaluación para las 5 categorías de las afectaciones, se presenta en la Tabla 9 un semáforo con colores y con una calificación numérica 1 a 4 para casos de estudio como se describió en los criterios de evaluación.

Tabla 9.

Evaluación de las afectaciones en los estudios de impacto ambiental de proyectos viales en la Región Caribe. Autoría propia.

		AFECTACIONES ESTUDIADAS				
	Proyecto vial	Conectividad hidrológica	Conductividad hidráulica	Alteración de la escorrentía superficial	Fragmentación del territorio	Conectividad ecológica
1	CONCESIÓN RUTA AL MAR S.A.S. Variante Loricá	4	1	3	3	3
2	CONCESIÓN RUTA DEL SOL II variante vial doble calzada troncal del Caribe	3	2	2	3	2
3	CONCESIÓN RUTA AL MAR S.A.S Tramo 7.3 Tolú- Pita abajo- El pueblito	3	1	2	3	3
4	CONCESIÓN CARTAGENA-BARRANQUILLA Y CIRCUNVALAR DE LA PROSPERIDAD (UNIDAD FUNCIONAL 6)	3	2	1	3	3
5	CONSTRUCCIÓN DE LA VARIANTE EN EL MUNICIPIO EL CARMEN DE BOLÍVAR, DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR	3	3	3	3	2
6	CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA VÍA BIDIRECCIONAL (VARIANTE) ENTRE EL MUNICIPIO DE SAN DIEGO Y LA VA LA PAZ VALLEDUPAR.	3	1	1	3	2
7	CONCESIÓN VIAL RUTA CARIBE TRAMO 5-6	3	1	1	2	1
8	CONCESIÓN RUTA AL MAR S.A.S Variante San Carlos	3	1	2	3	2

Fuente propia del autor

Las afectaciones enmarcadas dentro del concepto de “Conectividad hidrológica”, tuvieron una mayor ponderación en los casos analizados. En los casos 4, 5, 6 y 7 que tuvieron una ponderación de 3, se identificaron impactos asociados a esta afectación, además, las medidas están enfocadas a la compensación y mitigación asociado al manejo de residuos líquidos, materiales de construcción, y estructuras de drenaje. Debe tenerse en cuenta que para esos casos se trataba de áreas de bosque seco tropical en donde las dinámicas hídricas superficiales carecen de abundantes cuerpos de agua. En el caso 8 y 2 que están ubicados en sistemas de humedales, las medidas se orientaron a fichas de manejo de residuos líquidos y manejo de cruces con cuerpos de agua. Sin embargo, en esos casos resulta de especial importancia las modificaciones del balance y equilibrio hídrico natural (Bracken *et al.*, 2013; Golden *et al.*, 2014; Jaramillo, Brown, *et al.*, 2018; Raiter *et al.*, 2018). Esos balances se ven afectados por variaciones en el comportamiento de los flujos de agua y los sedimentos que arrastran las corrientes, según (Keesstra *et al.*, 2018) se conoce como la dinámica de flujos. Uno de los principales efectos de alterar los flujos entre cuerpos de agua es la consecuente alteración de la dinámica de sedimento que pasa por un punto en el paisaje (Bracken and Croke, 2007; Bracken *et al.*, 2013), pues a mediano y largo plazo se pueden presentar taponamiento de conexiones (Bracken and Croke, 2007; Wainwright *et al.*, 2011) e incluso desecación de humedales (Saaltink *et al.*, 2018).

La calificación en los casos 2 y 3 fue baja, a pesar de que son proyectos que están ubicados en áreas ricas en cuerpos de agua sus esfuerzos están orientados a la construcción de obras de drenaje menores como medida de paso de estas corrientes de un lado a otro sin un mayor análisis de los impactos a una escala mayor. Específicamente en el caso 2, al tener un antecedente asociado a la sedimentación que arrastra el río Magdalena a sus caños,

menciona la utilización de barras sedimentadoras, verjas de toldo o cubiertas vegetativas, barreras de protección de para cuerpos de agua en la construcción de pilotes en el proceso constructivo de los viaductos. Además de obras disipadoras de energía y obras de protección lateral (muros de gavión) que ayudan a que no se produzca socavación en las orillas.

En contraste, la afectación evaluada con menor valoración fue “Conductividad hidráulica” que involucra los intercambios con aguas subterráneas o la dinámica de los flujos que relaciona la conexión y transferencia del flujo subterráneo por un medio poroso (Bracken *et al.*, 2013). Los lineamientos de la Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura vial (2011) enfatizan la prohibición de vertimientos de agua en las cabeceras de los ríos y acuíferos por procesos constructivos en las obras viales. En los casos estudiados no se consideran ese tipo de afectaciones ni medidas de manejo al respecto, en cambio sí se mencionan medidas relacionadas con la protección de la contaminación de pozos o aljibes y el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas. De manera general, esta afectación en los casos estudios tienen poca valoración, debido a que las medidas de manejo no son claras para mantener los cambios de la capacidad de infiltración. Los esfuerzos que describen estos proyectos 1, 2, 3, 4, 6, 7 y 8 están asociado a las recomendaciones dadas por la guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura vial (2011), la cual prioriza la preservación de los acuíferos, de manera que estos no sean contaminados, asimismo, toman acciones para que la retroalimentación no se vea modificada. Por lo cual, los esfuerzos van dirigidos a tener medidas de manejo de los residuos sólidos y líquidos en las etapas constructivas para los cuerpos de agua cercanos a los proyectos.

El caso específico 5 cuyo entorno se caracterizó como un ecosistema de bosque seco tropical tiene una ponderación de 3 en todas las afectaciones. Sin embargo, las medidas de mitigación para los mismos, al igual que los otros proyectos, van asociados a mitigar la

alteración y calidad de los acuíferos. A pesar de la poca estimación en las medidas de manejo para esta afectación, los constantes cambios en los usos del suelo, compactación o impermeabilización pueden modificar la escorrentía subterránea, patrones de infiltración e intercambios con agua superficial, contaminación y calidad del agua y erosión del suelo también se ven afectadas (Brunke and Gonser, 1997; Thompson, Takken and Croke, 2008)

La tercera afectación de estudio, la “Escorrentía superficial” mantuvo cierta dispersión en la valoración de los casos. Algunos efectos agrupados aquí, y evidenciados en los casos de estudio, se asocian al cambio del uso del suelo que, al reducir la infiltración, aumentan la escorrentía superficial y en consecuencia alteran los regímenes de flujo y el balance hídrico natural (Bunn and Arthington, 2002). La ponderación de esta afectación para los casos de estudio muestra que solo dos proyectos, 1 y 5, tienen algunas medidas de manejo asociadas a este tipo de afectaciones, por lo cual tuvieron una ponderación de 3. Se trata de obras hidráulicas de drenaje para la conducción de las aguas lluvias y evitar el arrastre de material particulado hasta cuerpos de agua. Esto es lo recomendado según la Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura vial (2011) y en el Manual de drenaje para carreteras (2009), puesto que promueven el uso de obras de drenajes y subdrenaje para el paso de las aguas, por debajo de la vía, buscando que no se afecte el funcionamiento de la vía y también que, en zonas con alta presencia de sedimentos, éstos sean retenidos en los subdrenes. No obstante, los flujos cambian artificialmente, así como los regímenes de humedad a escalas del sitio, y como consecuencia las carreteras desvían y concentran los flujos naturales, impulsando nuevas formaciones de canales (Raiter *et al.*, 2018)

Los otros casos de estudio, como el 2, 3 y 8, mencionan únicamente medidas para evitar contaminación de fuentes líquidas y el manejo de drenaje para evitar contratiempos en la etapa

constructiva. Para los otros proyectos que tuvieron una valoración inferior, no se encontró algún impacto relacionado con la escorrentía superficial dentro de sus EIA y menos aún en los planes de manejo ambiental.

La cuarta afectación estudiada es la “Fragmentación del paisaje”, que tiene como propósito caracterizar el estado ambiental de un territorio, evaluar proyectos de infraestructura o sus modificaciones y realizar seguimiento de infraestructuras en funcionamiento en materia de división del territorio (Mancebo Quintana *et al.*, 2010; Marm, 2010). La Guía de manejo ambiental de proyectos de infraestructura vial (2011), plantea ciertas medidas de mitigación para los casos asociados a las variaciones en la calidad visual que tienen los ecosistemas, relacionadas a la empedradización y revegetalización en las zonas afectadas. En los estudios analizados se evidencia que, en todos los casos, la respectiva medida de mitigación está enfocada a la recuperación paisajística mediante lo mínimo exigido según la Guía (2011), que es la revegetalización. En los casos 1, 2, 3 y 8 que el proyecto se encuentra en entornos de humedales marino-costeros y de agua dulce, se identifica que existe una alteración de la calidad visual del paisaje, pero no se plantea manera específica para mitigar el efecto en este tipo de ecosistema. No obstante, esta afectación enfocada a efectos de borde o barrera, solo identifican como impacto el atropellamiento de fauna debido a las obras de infraestructura vial, y sus medidas de compensación se asocian a la señalización y socialización a la comunidad de animales en la vía.

La última evaluación reúne todas aquellas afectaciones relacionadas con la “Conectividad de ecosistemas”, tanto aquellas afectaciones directas como las indirectas, es decir, resultado de otra afectación sistémica. Se incluyen aquí desde los desplazamientos de organismos en su hábitat, hasta la desaparición de estos o ecosistemas completos. En los ecosistemas terrestres, los

efectos o impactos están relacionados con la interrupción de flujos de nutrientes, energía o de información genética y remoción de la capa vegetal, destrucción del hábitat (Saunders, Hobbs and Margules, 1999). En los ecosistemas de agua dulce, las alteraciones de las dinámicas de flujo o balance hídrico alteran el arrastre de sedimentos, la calidad del agua, como lo es la salinización (Entrekin *et al.*, 2019) el oxígeno disuelto, entre otros. La Guía de Manejo Ambiental de proyectos de infraestructura (2011) plantea mitigaciones relacionadas con la implementación de corredores biológicos, que permiten la movilidad de organismos y en cierta medida la continuidad de algunos flujos de energía. En los casos 3, 4 y 5 se mencionan impactos a la funcionalidad del ecosistema propio y proponen como medidas de mitigación la identificación y cerramiento de corredores naturales de fauna, señalización de paso de fauna, charlas de sensibilización a la comunidad acerca de la compensación de las especies, así como el rescate de estas. En el caso 1, se evidencia esta afectación tanto al ecosistema terrestre como acuático, estableciendo como medida de mitigación la recuperación paisajística, la revegetalización, y la realización de obras menores para garantizar el flujo hídrico natural del cuerpo cenagoso, teniendo en cuenta que, si se afecta en este lugar sin las medidas de mitigación correctas, la alteración llegaría a otras zonas del complejo cenagoso del Bajo Sinú. Por último, en los casos 2, 6 y 8 se identifica la alteración a la funcionalidad del ecosistema, o al hábitat como tal, pero sin garantizar una medida que permita el paso de los animales en la vía.

7. Análisis de resultados de los EIA

Medidas de gestión estándar y obsoletas

En términos generales, las afectaciones de la conectividad hidrológica fueron calificadas como las más altas, sin embargo, esa calificación no implica que para cada proyecto se realice las

medidas de mitigación adecuadas, ni que se realizara un estudio exhaustivo. Se considera que cada EIA trata entornos diferentes, por lo cual, no se deberían identificar los mismos impactos y se observaba en estos estudios, así como sus medidas de mitigación.

En los sistemas hídricos, ya sean superficiales o subterráneos, se identifica que los estudios y normatividad de estos casos se centran en medidas enfocadas a la prevención de la contaminación de las fuentes de agua, mantener el drenaje en términos de volumen de agua y construir estructuras de drenaje (para evacuar las aguas de escorrentía y evitar daños en las obras viales). Este enfoque ignora la necesidad de comprender la dinámica de conectividad de los cuerpos de agua y sus intrincados patrones de variabilidad espacial y temporal según lo estudiado por (Amoros and Bornette, 2002; Freeman, Pringle and Jackson, 2007b; Bracken *et al.*, 2013), lo que produce daños en el balance hídrico.

Otra consecuencia corresponde a la dinámica de flujo, la cual no es atendida por los EIA, donde la modificación del transporte de materia, energía y organismos dentro o entre cuerpos de agua afecta indirectamente la salud de los ecosistemas (Freeman, Pringle and Jackson, 2007b), la calidad del agua parámetros (Thompson, Takken and Croke, 2008) y la dinámica de arrastre de sedimentos (Brunke and Gonser, 1997).

Con respecto a los efectos de la fragmentación del territorio, se identificó que los EIA se enfocaron en los impactos asociados a los cambios del paisaje, uso de la tierra, eliminación de la cubierta vegetal y erosión. El alcance de las medidas de mitigación giraba en torno a la revegetación, siembra de especies nativas, señalización de corredores de vida silvestre y reubicación de especies. Pese a lo anterior, el fenómeno de la fragmentación en sí fue escasamente analizado, pues no se tuvo en cuenta los efectos sistémicos, ni se utilizaron

indicadores de fragmentación, destacados en la literatura científica. Estos indicadores evalúan la dinámica del hábitat y los procesos de los ecosistemas locales, lo que facilita el monitoreo de la pérdida de conectividad territorial en los hábitats a diversas escalas (Marm, 2010). Al igual que en los ecosistemas de agua dulce, las discontinuidades territoriales efecto barrera alteran el flujo de materiales, energía e información natural en el territorio, que son la base del desarrollo y la riqueza del sistema (Cardona-Almeida, Obregón and Canales, 2019) y afectan la biodiversidad y la redundancia ecológica (Jørgensen, 2012).

Escala regional

De los 8 estudios analizados, solo el caso 1 “*CONCESIÓN RUTA AL MAR S.A.S. Variante Lorica*”, tuvo en cuenta efectos adversos sobre la dinámica de las corrientes y comunicación con el complejo cenagoso que caracteriza ese territorio. Por lo anterior, se calificó con una ponderación de (4). Sin embargo, pese a que fue lo más cercano a considerar una escala regional, no analizaron en profundidad la alteración de corrientes y caudales, lo que conlleva a generar efectos ecológicos a gran escala que desequilibrarían aguas arriba el sistema. En cuanto a los ecosistemas terrestres, la fragmentación progresiva genera efectos a gran escala que provocan cambios en el paisaje y reducen los hábitats y la biodiversidad (Saunders, Hobbs and Margules, 1999; Gurrutxaga, 2011). Aun así, ninguno de los proyectos enumeró los posibles impactos externos o efectos diferentes a áreas de influencia limitadas, ignorando la naturaleza sistémica e interdependiente de los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Efectos acumulativos

El área de influencia de los casos de estudio cumple con lo establecido por los lineamientos legales. No obstante, dicha delimitación no considera las afectaciones espaciales

puede generar la interconexión y superposición de vías en un territorio, produciendo así efectos acumulados en espacio y tiempo.

Los casos analizados para estos proyectos no consideraron los efectos o acciones de mitigación de ningún otro proyecto cercano. Así mismo, no se evidencia recomendaciones o análisis sobre posibles proyectos futuros. Se identifica que todos los EIA analizados describen un escenario con y otro sin proyecto, pero, aun así, ninguno evaluó los impactos ambientales una vez finalizada la obra civil. Sólo los estudios 1 y 8 consideraron aspectos durante la etapa operativa de la vía, pero enfocados a aspectos socioeconómicos, como afectaciones a las actividades comerciales, impactos a la salud por el ruido. En otras palabras, se puede decir, que los EIA estudiaron y analizaron los impactos, pero durante la etapa de construcción y no posterior a esta.

Herramientas legales para los EIA

A pesar de que en nuestro país existan normativas claras y autoridades que regulen los EIA para el licenciamiento ambiental, existen vacíos en comparación con lo que menciona la comunidad científica. La nueva ley de infraestructura (Ley 1682 de 2013), a través de la cual se adoptan las medidas y disposiciones para el sector de infraestructura de transporte permite en relación con las licencias ambientales agilizar su expedición o rechazo. En el Título IV de la Ley, “Gestión y Adquisición Prediales, Gestión Ambiental, Activos y Redes De Servicios Públicos, de Tic y de la Industria Del Petróleo, entre otros y Permisos Mineros y Servidumbres, el capítulo II de la Ley “Gestión Ambiental”, se menciona en su Artículo 44, que los siguientes proyectos de infraestructura de transporte no requerirán Licencia Ambiental: a) Proyectos de mantenimiento; b) Proyectos de rehabilitación; c) Proyectos de mejoramiento. Ahora bien, el Decreto 769 de abril de 2014 estableció el listado de las actividades de mejoramiento en proyectos de

infraestructura de transporte, acorde con los estudios elaborados por los Ministerios de Transporte y Ambiente y Desarrollo Sostenible, en coordinación con la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. De esta manera, proyectos preexistentes que presenten adecuaciones de mejora como doble calzadas repavimentación o cambio de materiales de afirmado, no pasan por el proceso de evaluación de impactos ambientales y se implementa el instrumento de autogestión denominado Plan de Adaptación a la Gestión Ambiental - PAGA.

Con lo mencionado anteriormente, uno de los inconvenientes más evidentes en los procesos de licencias ambientales para obras de infraestructura vial en Colombia se presenta en que los proyectos no tienen un control de impactos en el tiempo, su foco de atención como se describió en el ítem de efectos acumulativos, se pueden presentar efectos a larga escala y solo se están identificando y mitigando en la etapa constructiva del proyecto.

Otros aspectos claves que generan vacíos en la temática en Colombia según (Morales and Moral, 2009; Toro, Requena and Zamorano, 2010; Soto, Suárez and Arrieta, 2018) es que el solicitante tiene la responsabilidad de escoger la metodología para evaluar los efectos de la obra sobre el ecosistema, de ese modo, la objetividad y la rigurosidad del proceso puede verse cuestionado.

Limitaciones

Es contradictorio identificar que a pesar de que la conectividad hidrológica obtuvo una calificación alta, los EIA muestran un mayor enfoque en la compensación de los ecosistemas terrestres y medidas como la revegetación, dando poca importancia a los impactos en la dinámica de los sistemas hídricos y los ecosistemas de agua dulce. Esa alta calificación está vinculada a

medidas implementadas con la frecuencia de estructuras de drenaje y monitoreo de la calidad del agua.

Esto constituye una limitación del método propuesto basado en la agrupación de cinco categorías de impactos / efectos. Dado el gran número y variedad de efectos / impactos en cada categoría, la agrupación puede enmascarar para calificaciones altas el detalle de qué medidas o análisis se están considerando. Sin embargo, da buena cuenta de qué categorías reciben menos atención, como la conductividad hidráulica. Esto hace que el método sea útil para comparaciones globales y no tan específicas, a menos que las columnas se desagreguen de esta manera.

Por otro lado, la matriz es fácilmente replicable con la misma categoría o con categorías nuevas según el contexto. Esta agrupación responde a la preocupación expresada por los expertos locales y permite la comparación directa con las herramientas de gestión en cuestión. Por el puntaje de la matriz de evaluación se evidenció una de las preocupaciones iniciales colocadas en la hipótesis, la poca conexión o contexto espacial de las EIA. Sin embargo, el reducido número de proyectos considerados impide dar conclusiones absolutas.

8. Conclusiones

Por medio del análisis y resultados de la muestra, de ocho casos de estudios de impacto ambiental en la región Caribe, se establece que, si bien se puede reconocer algunos impactos ambientales relacionados con cada afectación considerada en este estudio, ningún EIA abordó los efectos sistémicos a profundidad. No existen, ni se exigen herramientas de análisis complejas como modelos o análisis integrados para ayudar a comprender y mitigar los efectos y/o consecuencias producto de las obras viales, sino que se enumeran e implementan unas medidas

de mitigación casi estandarizadas siendo ecosistemas diferenciados. Por lo cual, existe una clara brecha entre el conocimiento actual y las medidas de gestión previstas en la legislación.

Los proyectos analizados, en cumplimiento de la normativa de gestión ambiental para proyectos de infraestructura vial, definieron un área de influencia para estudiar los impactos de las obras; sin embargo, los efectos regionales no se toman en cuenta cuando se limitan a esa área, ni se considera la conectividad espacial de los ecosistemas, sistemas hídricos y procesos funcionales del territorio. En otras palabras, la perspectiva regional que se quiso identificar no fue posible.

Se evidenció que los EIA se enfocaron en la etapa de construcción de los proyectos, es decir, medidas de mitigación de los efectos generados en los ecosistemas durante las obras de ejecución. Por lo tanto, no existe una herramienta o metodología de análisis para identificar, cuantificar, mitigar y rastrear los efectos a largo plazo resultantes de la imposición de una barrera física en el ambiente natural.

La infraestructura vial ha crecido gradualmente y la legislación sobre identificación y gestión de impactos ha cambiado, por lo que gran parte de las carreteras construidas en las últimas décadas no evaluaron los impactos sobre el medio ambiente. Además, las EIA analizadas no consideraron estrategias de gestión de otros proyectos viales anteriores o cercanos. Es previsible que la superposición de estos proyectos viales traiga efectos acumulativos a un área mayor de las respectivas áreas de influencia. Ese efecto acumulativo ocurre tanto espacialmente como a lo largo del tiempo, y las herramientas de gestión ambiental actuales para proyectos de infraestructura vial son incapaces de notar o estimarlo.

Es aconsejable desarrollar estudios sobre conectividad hídrica, conectividad ecológica y fragmentación territorial a nivel regional antes y junto al desarrollo de proyectos viales que servirán como base de planificación para proyectos futuros. No está claro cuáles son los efectos acumulativos sobre los ecosistemas caribeños de la infraestructura vial, por lo que es aconsejable proponer estudios que identifiquen impactos y restauren los servicios ecosistémicos en la región.

Referencias

- Agencia Nacional de Infraestructura - ANI (2018) ‘La ANI lidera en la región Caribe la revolución de la puertos y el corredor férreo central’, p. 4. Available at: <https://www.ani.gov.co/la-ani-lidera-en-la-region-caribe-la-revolucion-de-la-infraestructura-con-9-proyectos-viales-7>.
- Aldana-Domínguez, J. (2014) Biodiversidad Caribe y servicios ecosistémicos. Available at: <http://www.uninorte.edu.co/documents/72553/5b17cc71-a298-4fa0-8c78-cf457f2ef086>.
- Amoros, C. and Bornette, G. (2002) ‘Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains’, *Freshwater Biology*, 47(4), pp. 761–776. doi: 10.1046/j.1365-2427.2002.00905.x.
- Arroyave Maya, M. et al. (2006) ‘Impactos de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo’, *Revista EIA*. Escuela de ingeniería de Antioquia, (5), pp. 45–57. Available at: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=es (Accessed: 14 July 2020).
- Bracken, L. J. et al. (2013) ‘Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, Pathways and future agendas’, *Earth-Science Reviews*, 119, pp. 17–34. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.02.001.
- Bracken, L. J. and Croke, J. (2007) ‘The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems’, *Hydrological Processes*, 21(13), pp. 1749–1763. doi: 10.1002/hyp.6313.
- Brunke, M. and Gonser, T. (1997) ‘The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater’, *Freshwater Biology*, 37(1), pp. 1–33. doi: 10.1046/j.1365-

2427.1997.00143.x.

Bunn, S. E. and Arthington, A. H. (2002) 'Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity', *Environmental Management*, 30(4), pp. 492–507. doi: 10.1007/s00267-002-2737-0.

Cardona-Almeida, C., Obregón, N. and Canales, F. A. (2019) 'An integrative dynamic model of Colombian population distribution, based on the maximum entropy principle and matter, energy, and information flow', *Entropy*, 21(12). doi: 10.3390/e21121172.

Costanza, R. *et al.* (1997) 'The value of the world's ecosystem services and natural capital', *Nature*. Nature Publishing Group, 387(6630), pp. 253–260. doi: 10.1038/387253a0.

DANE (2019) 'Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 y desafíos socioeconómicos para la región Caribe', p. 61.

Entrekin, S. A. *et al.* (2019) 'Multiple riparian–stream connections are predicted to change in response to salinization', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1764).

Espinosa, L. F. *et al.* (2005) 'Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta: Informe', 725, pp. 1–91. Available at: http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/monitoreoCGSM/Informe_CGSM_2005.pdf.

Freeman, M. C., Pringle, C. M. and Jackson, C. R. (2007a) 'Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales', *Journal of the*

- American Water Resources Association*, 43(1), pp. 5–14. doi: 10.1111/j.1752-1688.2007.00002.x.
- Freeman, M. C., Pringle, C. M. and Jackson, C. R. (2007b) ‘Hydrologic Connectivity and the Contribution of Stream Headwaters to Ecological Integrity at Regional Scales’, *Journal of the American Water Resources Association*, 43, pp. 5–14.
- Fundación Alma and Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2013) *Deterioro de humedales en el Magdalena Medio: Un llamado para su conservación*.
- Golden, H. E. *et al.* (2014) ‘Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods’, *Environmental Modelling and Software*, 53, pp. 190–206. doi: 10.1016/j.envsoft.2013.12.004.
- Gurrutxaga, M. (2011) ‘La gestión de la conectividad ecológica del territorio en España: Iniciativas y retos’, *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, pp. 225–244.
- Gutiérrez-C., Á. L. and Pinilla-A., G. A. (2016) ‘Efectos de la conectividad local sobre los ensamblajes de peces en una planicie de inundación tropical’, *Caldasia*, 38(2), pp. 300–313. doi: 10.15446/caldasia.v38n2.60920.
- IDEAM (2015) Estudio Nacional del Agua 2014
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt and Potificia Javeriana(2015). ‘Caracterización socioecológica en las ventanas Piloto ciénaga de la virgen, ciénaga de zapatosa Y paz de ariporo & hato corozal a escala 1:25.000’. Available at <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/caracterizacion->

socioecologica-en-las-ventanas-piloto-ciénaga-de-la-virgen-ciénaga-de-zapatoza-y-paz-de-ariporo-y-hato-corozal-a-escala.pdf.

Instituto Nacional de Vías (2011) ‘Guía de Manejo Ambiental de Proyectos de Infraestructura Subsector Vial’. Available at <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/guia-de-manejo-ambiental-de-proyectos/971-guia-de-manejo-ambiental/file>

Instituto Nacional de Vías (2009) ‘Manual para hidrología, hidráulica con aplicación en el diseño y construcción de obras típicas para el drenaje y subdrenaje de carreteras’. Available at <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras/file>

Jaramillo, F., Brown, I., *et al.* (2018) ‘Assessment of hydrologic connectivity in an ungauged wetland with InSAR observations’, *Environmental Research Letters*, 13(2). doi: 10.1088/1748-9326/aa9d23.

Jaramillo, F., Licero, L., *et al.* (2018) ‘Effects of Hydroclimatic Change and Rehabilitation Activities on Salinity and Mangroves in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia’, *Wetlands*. *Wetlands*, 38(4), pp. 755–767. doi: 10.1007/s13157-018-1024-7.

Jørgensen, S. (2012) *Introduction to systems ecology*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis.

Karlson, M. and Mörtberg, U. (2015) ‘A spatial ecological assessment of fragmentation and disturbance effects of the Swedish road network’, *Landscape and Urban Planning*. Elsevier B.V., 134, pp. 53–65. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.009.

Karlson, M., Mörtberg, U. and Balfors, B. (2014) ‘Road ecology in environmental impact

- assessment', *Environmental Impact Assessment Review*. Elsevier Inc., 48, pp. 10–19. doi: 10.1016/j.eiar.2014.04.002.
- Keesstra, S. *et al.* (2018) 'The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics?', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 644, pp. 1557–1572. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.342.
- Khan, A. A. *et al.* (2019) 'Fuzzy AHP based prioritization and taxonomy of software process improvement success factors in global software development', *Applied Soft Computing*, 83, p. 105648. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105648>.
- L. Mesa-S, M. S. (no date) *V olumen 3 CAtÁlogo de Biodiversidad para la región CARIBE CAtÁlogo de Biodiversidad*.
- Langen, T. A. *et al.* (2012) 'Road mortality in freshwater turtles: Identifying causes of spatial patterns to optimize road planning and mitigation', *Biodiversity and Conservation*, 21(12), pp. 3017–3034. doi: 10.1007/s10531-012-0352-9.
- Mancebo Quintana, S. *et al.* (2010) 'A model for assessing habitat fragmentation caused by new infrastructures in extensive territories - Evaluation of the impact of the Spanish strategic infrastructure and transport plan', *Journal of Environmental Management*, 91(5), pp. 1087–1096. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.12.013.
- Marm (2010) *Indicadores de fragmentación de hábitat causada por infraestr.*
- Martinez, A. R. (2005) 'Ciénaga Grande de Santa Marta un modelo de gestion interinstitucional para su recuperación', *Spaw-Palisting.Org*, p. 11. Available at: <http://www.spaw-palisting.org/uploads/files/ad85a916243db9d56ad045bb90c493c32acc2823.pdf>.

- Meisel-Roca, A. and Pérez-Valbuena, G. J. (2008) 'Geografía física y poblamiento en la costa Caribe colombiana', *Geografía económica y análisis espacial en Colombia. Capítulo 2. Geografía física y poblamiento en la costa Caribe colombiana. Pág.:47-106, (73)*. Available at: <http://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/461>.
- Mendoza, A. *et al.* (2019) 'Application of the analytical hierarchy process (AHP) for decision-making with expert judgment', *Ingeniare*. Universidad de Tarapaca, 27(3), pp. 348–360. doi: 10.4067/S0718-33052019000300348.
- Mintransporte (2018) 'Con el programa vías 4G, Colombia se pone al día en materia de infraestructura', *Agencia Nacional de Infraestructura*.
- Morales, A. and Moral, D. E. L. (2009) *Universidad de granada*.
- Pavlickova, K. and Vyskupova, M. (2015) 'A method proposal for cumulative environmental impact assessment based on the landscape vulnerability evaluation', *Environmental Impact Assessment Review*, 50, pp. 74–84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.08.011>.
- Peláez Ponce, A. V. *et al.* (2011) 'Inversión en Infraestructura Pública y Reducción de la Pobreza en América Latina', p. 150.
- Peña Racero, S. Y. (2019) '*Relación entre el proceso de expansión urbana y los ecosistemas costeros de los municipios de córdoba y sucre (colombia): un aspecto clave en el ordenamiento territorial*'. Available at: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/2565/peñaraceroshilaryohana.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed: 22 September 2020).
- Pérez, A. *et al.* (2017) 'Protocolo de degradación de suelos y tierras por desertificación', BMC

- Public Health, 5(1), pp. 1–8. Available at:
<https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298>
<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jana.2015.10.005>
<http://www.biomedcentral.com/1471-2458/12/58>
<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&P>.
- Raiter, K. G. et al. (2018) ‘Linear infrastructure impacts on landscape hydrology’, *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 206, pp. 446–457. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.10.036.
- Rangel-Buitrago, N. G. and Posada-Posada, B. O. (2005) ‘Geomorfología y procesos erosivos en la costa norte del departamento de córdoba, caribe colombiano (sector paso nuevo-cristo rey)’, *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 34(895), pp. 101–119.
- Reid, J. et al. (2015) ‘Ecological Compensation to Address Environmental Externalities: Lessons from South American Case Studies’, *Journal of Sustainable Forestry*, 34(6–7), pp. 605–622. doi: 10.1080/10549811.2015.1046081.
- Restrepo, J. C. (2014) ‘Dinámica Sedimentaria en Deltas Micromareales – Estratificados de Alta Descarga: Delta del Río Magdalena (Colombia – Mar Caribe)’, p. 142.
- Ritter, C. D. et al. (2017) ‘Environmental impact assessment in Brazilian Amazonia: Challenges and prospects to assess biodiversity’, *Biological Conservation*. Elsevier Ltd, pp. 161–168. doi: 10.1016/j.biocon.2016.12.031.
- Saaltink, R. M. et al. (2018) ‘Vegetation growth and sediment dynamics in a created freshwater wetland’, *Ecological Engineering*, 111(November 2017), pp. 11–21. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.11.020.

- Saunders, D. A., Hobbs, R. J. and Margules, C. R. (1999) 'Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review', *NCASI Technical Bulletin*, pp. 469–470.
- Soto, V., Suárez, N. and Arrieta, S. (2018) 'Análisis comparativo de los métodos de evaluación de impacto ambiental aplicados en el subsector vial en Colombia', *Revista de investigación agraria y ambiental*, 9(2), pp. 281–294. doi: <https://doi.org/10.22490/21456453.2174>.
- Thompson, C. J., Takken, I. and Croke, J. (2008) 'Hydrological and sedimentological connectivity of unsealed roads', *IAHS-AISH Publication*, (325), pp. 524–531.
- Toro, J., Requena, I. and Zamorano, M. (2010) 'Environmental impact assessment in Colombia: Critical analysis and proposals for improvement', *Environmental Impact Assessment Review*. Elsevier, 30(4), pp. 247–261. doi: 10.1016/j.eiar.2009.09.001.
- Wainwright, J. *et al.* (2011) 'Linking environmental régimes, space and time: Interpretations of structural and functional connectivity', *Geomorphology*, 126(3), pp. 387–404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.027>.

Anexos

ECUACIONES DE BÚSQUEDA	ARTÍCULOS ENCONTRADOS	ARTÍCULOS ANALIZADOS
BÚSQUEDA PRELIMINAR		
Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("ENVIRONMENTAL AND EFFECTS") AND ("ROAD AND INFRASTRUCTURE") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ARTICLE")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVIRONMENTAL SCIENCE"))) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "JOURNAL") AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010))	198	12
BÚSQUEDA ESPECÍFICA		
Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("HYDRAULIC AND CONNECTIVITY") AND ("HIGHWAY")	10	2
Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("WETLAND AND CONNECTIVITY") AND ("HIGHWAY")	6	2
Db: Scopus TITLE-ABS-KEY (salinity AND highway) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ARTICLE")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVIRONMENTAL SCIENCE")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Salinity") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Roads And Streets") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Groundwater")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "JOURNAL"))	36	1
Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("UNDERGROUND AND WATER") AND ("HIGHWAY) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ARTICLE")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVIRONMENTAL SCIENCE")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Groundwater") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Highway engineering") OR LIMIT-TO (13	0

<p>EXACTKEYWORD , "Groundwater")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "JOURNAL"))</p>		
<p>Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("UNDERGROUND AND WATER") AND ("HIGHWAY) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ARTICLE")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGINEERING")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010))</p>	22	1
<p>Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("INFILTRATION AND CAPACITY") AND ("HIGHWAY) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ARTICLE")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGINEERING")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010))</p>	12	1
<p>Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("RUNOFF AND WATER") AND ("HIGHWAY) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ARTICLE")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGINEERING")) OR (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVIRONMENTAL SCIENCE")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Runoff") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Highway") AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "JOURNAL"))</p>	43	0
<p>Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("HABITAT AND FRAGMENTATION") AND ("HIGHWAY) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ARTICLE")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVIRONMENTAL SCIENCE")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Habitat fragmentation") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Road") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Connectivity") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Fragmentation highway") AND (LIMIT-TO (</p>	73	3

SRCTYPE , "JOURNAL")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011))		
Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("HYDROLOGICAL CONNECTIVITY") AND ("ROAD")	26	3
Db: Scopus TITLE-ABS-KEY ("WATER CONNECTIVITY") LIMIT- TO "Article" AND "Highway" AND "Highway planning" AND "Connectivity"	37	1
Db: WOS TOPIC: (WATER CONNECTIVITY) AND "HIGHWAY"	3	3
Db: WOS TOPIC: (UNDERGROUND WATER) AND TOPIC: (HIGHWAY) Refined by: PUBLICATION YEARS: (2020 OR 2019 OR 2018 OR 2017 OR 2016 OR 2015 OR 2014 OR 2013 OR 2012 OR 2011 OR 2010 OR 2009)	4	1
Db: WOS TOPIC: (INFILTRATION CAPACITY) AND TOPIC: (HIGHWAY) Refined by: PUBLICATION YEARS: (2020 OR 2019 OR 2018 OR 2017 OR 2016 OR 2015 OR 2014 OR 2013 OR 2012 OR 2011 OR 2010 OR 2009)	22	1
Db: WOS TOPIC: (HABITAT FRAGMENTATION AND "HIGHWAY"	176	8

Tabla 10. Ecuaciones de búsqueda de afectaciones debidas a la infraestructura vial, en la literatura científica.

Autoría propia.