



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Los accesos viales como elemento transformador del paisaje y su relación con patrones y procesos de ocupación en la amazonia colombiana

Luz Alejandra Gómez Gallego

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Estudios Ambientales
Bogotá, Colombia
Año 2025

Los accesos viales como elemento transformador del paisaje y su relación con patrones y procesos de ocupación en la amazonia colombiana

Luz Alejandra Gómez Gallego

Trabajo de grado de profundización presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):

Doctor en Ciencias Forestales
Samuel Eduardo Otavo Olarte

Codirector (a):

Doctora en Estudios Ambientales y Rurales
Carmenza Castiblanco Rozo

Línea de Investigación:

Economía, Ambiente y Desarrollo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Estudios Ambientales

Bogotá, Colombia

Año 2025

*A mi hijo Samuel, para que puedas crecer feliz
en un mejor planeta*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Luz Alejandra Gómez Gallego_____

Nombre

Fecha 01/09/2025

Fecha

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento en primer lugar a Dios y mi familia por el apoyo incondicional en el logro de mis metas profesionales, sin ello no hubiese sido posible. A mis amigos que con sus palabras de ánimo me impulsaron a concretar este trabajo y seguir adelante.

A mi director y amigo, Doctor Samuel Otavo, por su dedicación y paciencia infinita. Su dirección académica, llena de sabiduría y estímulo, ha sido fundamental para dar forma a esta investigación y mi crecimiento como investigadora.

Agradezco inmensamente al equipo de la Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible, por su apoyo en el desarrollo de este estudio y doy un enorme reconocimiento porque día a día se levantan para construir un mejor país.

Resumen

Los accesos viales como elemento transformador del paisaje y su relación con patrones y procesos de ocupación en la amazonia colombiana

Este estudio aborda la influencia de los accesos viales en la transformación del paisaje y su relación con los patrones y procesos de ocupación en la Amazonia colombiana, ya que allí se concentra cerca del 65% de la deforestación nacional entre 2016 y 2023. La consolidación de infraestructura vial es una de las principales causas que impulsan el cambio de usos del suelo y la pérdida de bosque.

Se estimó mediante un modelo de Regresión Logístico (Logit) que las causas que generan cambios en el uso del suelo con relación a los accesos viales son los pastos, los pozos de hidrocarburo, los centros poblados, la ganadería y las quemadas, que influyen positivamente en la probabilidad de presencia de las vías, con los pastos mostrando una relación casi perfecta o determinista. Adicionalmente, se destaca que, por análisis de proximidad el 90% de la deforestación se concentra fuertemente en los primeros 3.6 km de un eje vial.

Se generó un análisis de patrones de ocupación (2020-2024) que mostró una evolución desde el patrón difuso (ocupación inicial) hacia patrones lineales y "espina de pescado", directamente vinculados a la construcción de vías, finalizando en patrón consolidado de transformación y ocupación. Estos patrones se localizan principalmente en el arco de deforestación amazónico, impactando áreas de alta importancia ambiental y cultural. El estudio proporciona una base científica para la planificación territorial sostenible y la formulación de políticas de conservación en la región.

Palabras clave: Accesos viales, deforestación, patrones, modelamiento, cambio de uso del suelo, Amazonia colombiana.

Abstract

Road Access as a Transforming Element of the Landscape and its Relationship with Settlement Patterns and Processes in the Colombian Amazon

This study addresses the influence of road access on landscape transformation and its relationship with settlement patterns and processes in the Colombian Amazon, given that approximately 65% of national deforestation between 2016 and 2023 is concentrated there. The consolidation of road infrastructure is one of the main drivers of land use change and forest loss.

Using a Logistic Regression (Logit) model, it was estimated that the causes of land-use change related to road access are pastures, hydrocarbon wells, population centers, cattle ranching, and burnings, which all have a positive influence on the probability of roads being present. Pastures showed an almost perfect or deterministic relationship. Additionally, a proximity analysis highlighted that 90% of deforestation is heavily concentrated within the first 3.6 km of a road axis.

An analysis of settlement patterns (2020-2024) revealed an evolution from a diffuse pattern (initial settlement) to linear and "fishbone" patterns, which are directly linked to road construction, culminating in a consolidated pattern of transformation and settlement. These patterns are mainly located in the Amazonian arc of deforestation, impacting areas of high environmental and cultural importance. The study provides a scientific basis for sustainable territorial planning and the formulation of conservation policies in the region.

Keywords: Road access, deforestation, patterns, modeling, Land use change, Colombian Amazon.

Contenido

	Pág.
Lista de figuras.....	9
Lista de tablas	10
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	11
Introducción.....	1
1. Capítulo 1.....	5
1.1 Marco teórico	5
1.2 Revisión de la literatura.....	14
1.3 Antecedentes	19
2. Capítulo 2: Metodología.....	22
2.1 Tipo de investigación.....	22
2.2 Diseño de la investigación	22
2.3 Definición del área de estudio	24
2.4 Técnicas de análisis de datos.....	26
2.5 Datos y variables.....	27
2.5.1 Priorización de las variables	30
2.6 Análisis de datos	31
3. Capítulo 3: Resultados.....	35
3.1 Análisis de influencia / proximidad de las vías.....	35
3.2 Análisis cuantitativo de datos	39
3.3 Aplicación modelo de relación de variables	44
3.4 Análisis de patrones y procesos de ocupación por accesos viales	52
4. Conclusiones y recomendaciones.....	61
4.1 Conclusiones.....	61
4.2 Recomendaciones.....	63

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Esquema de relación de la variable accesos viales con las variables independientes.....	9
Figura 1-2. Representación distancia euclidiana con origen vial en un ráster	13
Figura 1-3. Red de modelos de cambios de cobertura en la Amazonia	15
Figura 1-4. Red de modelos de deforestación y acceso viales en la Amazonia	16
Figura 1-5. Artículos relacionados con los accesos viales en la Amazonia	17
Figura 1-6. Árbol de clasificación de artículos para deforestación y accesos viales	18
Figura 1-7. Árbol de clasificación de artículos para fragmentación, cambio en la cobertura de la tierra y ocupación del territorio	19
Figura 2-1. Metodología del estudio.....	23
Figura 2-2. Mapa del área de estudio	26
Figura 2-3. Priorización de las variables	30
Figura 3-1. Distancia euclidiana a vías y deforestación	36
Figura 3-2. Proximidad de la deforestación acumulada a las vías.....	37
Figura 3-3. Deforestación en la vía Calamar – Miraflores	38
Figura 3-4. Proximidad de la deforestación acumulada a la vía Calamar - Miraflores	39
Figura 3-5. Histogramas de frecuencias para las variables originales.....	42
Figura 3-6. Matriz de correlación de Spearman para las variables.....	43
Figura 3-7. Resultado del modelo de regresión logística	46
Figura 3-8. Patrones espaciales para los años 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024	54
Figura 3-9. Trayectoria espaciotemporal de los patrones espaciales según tipología	56
Figura 3-10. Diagrama de flujo de cambio entre 2020 y 2024.....	57
Figura 3-11. Patrones espaciales en Mapiripán entre 2020 y 2024 (azul=difuso, rojo=lineal, magenta=multidireccional, negro=espina de pescado).....	58
Figura 3-12. Patrones espaciales en borde PNN Serranía de Chiribiquete entre 2020 y 2024 (azul=difuso, rojo=lineal, magenta=multidireccional, negro=espina de pescado, amarillo=consolidado)	59

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Tipología de los patrones asociado a procesos de ocupación, gris = transformado (adaptado de Gavlak et al., 2011; Figueiredo et al., 2024).....	10
Tabla 1-2. Métricas del paisaje. (Adaptado de Silva, Körting et al., 2008).....	12
Tabla 2-1. Variables en los estudios	28
Tabla 3-1. Estadísticas descriptivas para el área de análisis.....	39
Tabla 3-2. Valores de referencia para la Magnitud de los Odds Radio	45
Tabla 3-3. Cálculo Odds Radio de los coeficientes	47
Tabla 3-4. Magnitud de los Odds Radio de las variables independientes.....	47
Tabla 3-5. Cálculo Factor Inflacionario de la Varianza (FIV).....	51
Tabla 3-6. Relación de las métricas del paisaje y patrones espaciales	53

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
Ha	Hectáreas		
Km^2	Kilómetros cuadrados		
Km	Kilómetros		
Log	Logaritmo		Ec. 1.1
X	Variable		Ec. 1.1
P	Probabilidad		Ec. 1.1
d	Distancia Euclidiana		Ec. 1.2
x_2	Distancia final eje x		Ec. 1.2
x_1	Distancia inicial eje x		Ec. 1.2
y_2	Distancia final eje y		Ec. 1.2
y_1	Distancia inicial eje y		Ec. 1.2

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
β_0	Es el Intercepto de la función		Ec. 1.1
β_i	Coefficientes de la regresión		Ec. 1.1

Introducción

La gran cuenca Amazonia con 6.925.918 km², cuenta con una gran diversidad de géneros y especies de flora de bosque húmedo tropical a nivel mundial (Cardoso et al., 2017), los cuales, son considerados proveedores importantes de servicios ecosistémicos como el secuestro de carbono y la regulación de los ciclos del agua y los nutrientes, que contribuyen a la vida humana y la sustentan a escala local, regional e incluso global (Metzger et al., 2006; Phillips et al., 2008). El cambio de uso y cobertura del suelo y la consecuente deforestación es una de las principales causas que más está afectando el ambiente de todo el planeta, incluyendo la Amazonia (IPBES, 2019). La cuenca amazónica está conformada por nueve países, Brasil, Perú, Colombia, Venezuela, Ecuador, Bolivia, Guyana, Surinam y la Guayana Francesa; teniendo la Amazonia colombiana una representación del 6% de la cuenca (RAISG, 2020) y no siendo ajena a las actividades de transformación antrópica (Armenteras y Retana, 2012; Hoffmann et al., 2018; Murad y Pearse, 2018), este territorio afronta la pérdida creciente de sus ecosistemas naturales y por ende la disminución de la biodiversidad y servicios ecosistémicos (Metzger et al., 2006; Pimm et al., 2014).

Para el año 2023, en Colombia se perdieron 79.256 ha de bosque en total y cerca del 56% se concentró en la Amazonia colombiana, lo que corresponde a 44.383 ha (IDEAM, 2024). Se ha establecido para la Amazonia colombiana que al menos seis causas inciden sobre procesos de deforestación: i) concentración de la tierra, ii) expansión de la frontera agrícola, iii) expansión de la ganadería, iv) consolidación de infraestructura vial, v) explotación de recursos minero-energéticos, y vi) la implementación de cultivos de uso ilícito (Armenteras y Retana, 2012; SINCHI 2018; IDEAM 2024). Cada una de estas causas presenta factores directos e indirectos, y afectan de manera diferencial el territorio, dependiendo de las condiciones ambientales y el desarrollo de sinergias entre ellas a diferentes escalas. Con referencia a lo anterior, se ha demostrado que la apertura y ampliación de ejes viales impulsa el cambio de uso y coberturas del suelo, consolidando

la ocupación del territorio, el incremento de la deforestación (González et al., 2018; Rojas et al., 2021).

La tendencia de deforestación en la Amazonia colombiana que registró que para el año 2017 la deforestación se incrementara un 94% respecto al 2016 (152.105 hectáreas) (IDEAM, 2022), se ha visto históricamente afectada por la presencia de actores armados ilegales en el territorio. El acuerdo de paz firmado en noviembre de 2016 entre el Estado Colombiano y las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia – Ejército del Pueblo (FARC-EP); llevaron a la salida de un actor que ejercía control sobre el territorio, evidenciando la debilidad sistemática del gobierno en la gestión histórica de territorios apartados y de cumplimiento de la ley, lo cual, permitió que terratenientes y actores ilegales retomaran el control de las tierras, causando el deterioro del patrimonio natural, cultural y social (Clerici et al., 2020; Murillo-Sandoval et al., 2020; Prem et al., 2020). El retorno del conflicto armado en Amazonia incrementó el desarrollo de infraestructura vial no planificada y sin ningún proceso de licenciamiento (González, J. et al., 2018), lo que indicó que en el arco de deforestación amazónico, para el año 2022, se identificaran 26.915 km de vías de los cuales, 742 km correspondieron a trazados de nuevas vías en el año 2022 que están ingresando a áreas de alta importancia ambiental y cultural como los son las áreas protegidas nacionales, los resguardos indígenas y la Reserva Forestal de la Amazonia de Ley 2da de 1959 (FCDS, 2022).

Una de las principales causas que genera el cambio de uso y cobertura del suelo en la Amazonia colombiana son los accesos viales (Etter et al., 2008; Armenteras et al., 2019; Camacho 2022; Agudelo-Hz et al., 2023), ya que, por su proximidad, permiten la accesibilidad a áreas distantes y bien conservadas, favoreciendo procesos como la ocupación del territorio y posteriormente la pérdida de bosque con fines de expansión agropecuaria (Etter et al., 2006; Agudelo et al., 2023). Bajo este contexto, el conocimiento de las transformaciones generadas por los accesos viales y los patrones de ocupación de la Amazonia colombiana son cruciales para una adecuada planificación, manejo y restauración del paisaje. Por lo tanto, este trabajo se centra en analizar las transformaciones generadas por las vías y los patrones y procesos de ocupación del territorio amazónico colombiano.

Para lograr lo anterior se abordaron los siguientes objetivos:

1- Identificar la relación entre los accesos viales y el cambio de uso y cobertura del suelo, considerando los patrones y procesos de ocupación del territorio.

A partir de la revisión de la literatura, se identificaron 10 causas que generan cambio de uso del suelo en relación con los accesos viales, estas son: asentamientos (centros poblados), pozos hidrocarburos, explotación minera (títulos mineros), cultivos de coca, quemas, ganadería extensiva, accesos fluviales (ríos), deforestación, tierras cultivadas y pastos. La evolución temporal del cambio de cobertura entre los años 2020 y 2024 asociadas a estas causas, y mediante la tipología de patrones expuesta por (Gavlak et al., 2011; Figueiredo et al., 2024) permitió identificar la configuración espacial del cambio de cobertura por la existencia de un acceso vial y su comportamiento a través del tiempo dando como resultado los patrones difusos, lineal y espina de pescado.

2- Analizar la influencia en la transformación del paisaje generada por los accesos viales.

A partir del concepto de distancia euclidiana, se analizó para un periodo entre 2018 y 2024, la relación de la deforestación con la distancia al eje vial, encontrando que el 90% de la deforestación de arco de deforestación amazónico, se localiza en los primeros 3,6 km de la vía. Sin embargo en escala más detallada, cuando se analiza puntualmente una vía, como la que conecta el centro poblado de Calamar con Miraflores en el departamento del Guaviare, mostró que el 90% de la deforestación se localiza en los primeros 1,7 km de la vía, revelando la variabilidad y complejidad de procesos de transformación en la Amazonia.

3- Implementar un modelo que permita analizar las relaciones entre accesos viales, ocupación del territorio y dinámicas de transformación en el contexto amazónico colombiano.

Partiendo de las causas identificadas en el Objetivo 1, se realizó un modelo de Regresión Logístico (Logit) que analizó la probabilidad de ocurrencia de vías en función de la relación con variables que indicaron dinámicas de transformación en la Amazonia. El resultado reveló que los pastos, los pozos de hidrocarburos, los centros poblados, la ganadería y las quemas influyen positivamente en la probabilidad de presencia de las vías, con los pastos

mostrando una relación casi perfecta o determinista; mientras que los ríos, cultivos de coca y las tierras cultivadas disminuían la probabilidad de la existencia de los accesos viales.

El estudio proporciona una base científica para el fortalecimiento de la planificación territorial sostenible con enfoque participativo y de gobernanza que involucre a las comunidades locales, indígenas y autoridades en la toma de decisiones de la Amazonia. La estrecha relación de causalidad entre la construcción de vías y la deforestación requiere de acciones contundentes para su control y reducción por lo que es importante poder tener un control efectivo en el territorio, fortaleciendo la capacidad de las instituciones para combatir la pérdida de bosque, la siembra de cultivos de uso ilícito, la creación de vías ilegales no planificadas y la ganadería extensiva en áreas de alta importancia ambiental y cultural. Fomentar la infraestructura verde vial y conectividad ecológica es clave para mantener la integridad de los bosques y la biodiversidad, además de mantener conservada la Amazonia colombiana y no llegar al Punto de Inflexión o Punto de no Retorno.

1. Capítulo 1

1.1 Marco teórico

En este capítulo se presenta un marco teórico sobre los accesos viales, el cambio de uso del suelo y sus impulsores, modelos de relación y estadística espacial de los factores direccionadores del cambio de uso a través del modelo de Regresión logarítmica. Adicionalmente se expone la transformación multitemporal del paisaje a través de los tipos de patrones espaciales, teniendo como base las métricas del paisaje desarrolladas por la ecología del paisaje y el concepto de proximidad por distancia euclidiana.

1.1.1. Accesos viales

La Ley 1228 de 2018, define el Sistema Nacional de Carreteras o Red Vial Nacional, y denomina “arteriales” a las vías de primer orden, “intermunicipales” a las de segundo orden y “veredales” a las de tercer orden. En el ámbito de las vías de tercer orden, se encuentra los accesos viales, que son aquellas que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí (González et al., 2025). Estos tipos de accesos viales predominan en la Amazonia colombiana y se ha generado un incremento en la apertura de nuevos accesos viales secundarios y terciarios que buscan conectar posteriormente con la red primaria hacia el interior del país (MADS, 2021a).

Sin embargo, también existen accesos viales que se encuentran bajo el dosel, que han sido construidos hace más de 20 años en el interior del bosque amazónico y han pasado por un proceso de recuperación vegetal arbórea, pero que son utilizadas por diferentes actores armados ilegales que hacen presencia en la región (González y Gómez, 2020)

(Botero, 2023), este tipo de accesos son imperceptibles a la luz de la imágenes de satélite recientes, lo que hace necesario el uso de imágenes multitemporales más antiguas para establecer y confirmar su existencia.

1.1.2. Cambio de uso del suelo

La Amazonia colombiana ha sido escenario de diversos modelos de ocupación, que buscan explotar y extraer los recursos naturales de manera indiscriminada (Pérez, 2020), generando la consolidación de centros poblados como nodos de interconexión que se conectan por medio de vías para facilitar el acceso a lugares más internos y mejor conservados del ecosistema boscoso, que propician cambios en la cobertura y uso de suelo (Etter et al., 2006; Bax et al., 2016).

Los cambios en el uso y la cobertura del suelo son el resultado de las interacciones entre múltiples actores, demandas sociales y factores como las tecnologías, las instituciones y las prácticas culturales que impulsan y moldean la transformación territorial. Estos procesos también se ven influenciados por la retroalimentación entre las actividades humanas y culturales, la dinámica ambiental, los entornos biofísicos y las actividades económicas (Verburg et al., 2015; Lambin et al., 2003). Los cambios específicos y directos —como la deforestación o la conversión de cultivos— ocurren en espacios concretos y periodos breves, con relaciones de múltiples factores que al combinarse, generan procesos complejos que reconfiguran paisajes y trascienden escalas temporales más amplias (Lambin y Meyfroidt, 2010), revelando distintos patrones de interacción causal - como la necesidad de construcción de carreteras - para la extracción de madera o expansión agrícola, impulsada por políticas y factores institucionales, económicos y culturales (Geist y Lambin, 2002).

Los impulsores directos que determinan el cambio de uso del suelo son (IPBES, 2019):

1. La agricultura, incluido el pastoreo, tiene un impacto inmenso en los ecosistemas terrestres, con diferencias importantes según la intensidad y el tamaño de la práctica.
2. La extracción de madera en industrial junto con el uso de bioenergía en las zonas rurales de las regiones más pobres.
3. La recolección de plantas y animales silvestres.
4. La minería con grandes impactos en los puntos críticos de biodiversidad terrestre.
5. Las presas, las carreteras y las ciudades tienen fuertes impactos negativos locales en la naturaleza.
6. El turismo con enormes impactos en la naturaleza en general.
7. El transporte aéreo y marítimo de mercancías y personas.

Los anteriores impulsores, generan impactos sobre la biodiversidad, suelos y ecosistemas, ya que la expansión agrícola es la que más genera cambio de la cobertura terrestre (IPBES, 2019), por lo que más de un tercio de esta superficie está destinada a cultivos o ganadería. La urbanización y el crecimiento poblacional propician a que se incremente el consumo de los recursos naturales y la extensión de área urbana. Adicionalmente el cambio en la cobertura terrestre se ha fragmentado cada vez más como resultado de la tala industrial, la expansión agrícola, los incendios y la minería/extracción de recursos, lo que ha acelerado la degradación de las tierras, que impulsa a una reducción o pérdida de la productividad y complejidad biológica (incluida la erosión del suelo, el deterioro de las propiedades físicas, químicas, biológicas de los suelos, la pérdida a largo plazo de vegetación, cambios progresivos en las funciones ecosistémicas), en donde las prácticas ganaderas son las principales causas de la degradación de los pastizales ya que inciden en la aparición de incendios en el suelo para los regímenes de la cosecha (IPBES, 2019).

Para comprender estas dinámicas, investigaciones recientes se han enfocado en analizar patrones, identificar impulsores y explicar las relaciones causales entre los cambios en el territorio, utilizando enfoques deductivos que permiten vincular las transformaciones espaciales con sus consecuencias socioambientales a lo largo del tiempo (Magliocca et al., 2015; Figueiredo et al., 2024).

- **Bosque y Deforestación**

Los bosques son *“Tierra ocupada principalmente por árboles que puede contener arbustos, palmas, guaduas, hierbas y lianas, en la que predomina la cobertura arbórea con una densidad mínima del dosel de 30%, una altura mínima del dosel (in situ) de 5 m al momento de su identificación, y un área mínima de 1,0 ha. Se excluyen las coberturas arbóreas de plantaciones forestales comerciales, cultivos de palma, y árboles sembrados para la producción agropecuaria”* (IDEAM, 2023). La deforestación corresponde a la conversión del bosque a otros usos de la tierra, como la agricultura y la infraestructura (FAO, 2020). La aparición de nuevos accesos viales en la Amazonia colombiana ha favorecido los procesos de cambio de usos y cobertura del suelo, resaltando el fenómeno de la deforestación.

1.2. Modelos de relación y estadística espacial

Para analizar la relación de causalidad que tiene la aparición de nuevos accesos viales en la Amazonia, existen modelos estadísticos que permiten identificar los impulsores de la probabilidad de existencia de los accesos viales, a través de modelos de relación y estadística espacial (Camacho, 2022). En la Figura 1-1, se observa el esquema de relación adaptado del estudio de Camacho para mostrar la relación de la variable dependiente (accesos viales) y las variables independientes.

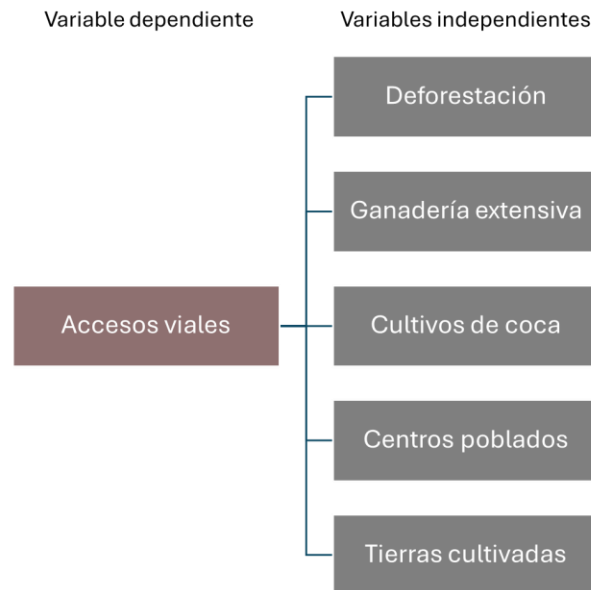


Figura 1-1. Esquema de relación de la variable accesos viales con las variables independientes

Existen varios modelos matemáticos que permiten encontrar las relaciones entre las variables, uno de ellos es el modelo de Regresión Logística (Ecuación 1-1). Este modelo determina a partir de variables dicótomas la probabilidad de ocurrencia de las variables explicativas con relación a la variable a explicar (Kleinbaum y Klein, 2010).

La forma de cálculo es la siguiente (Ecuación 1-1):

$$\text{Log} \left(\frac{P}{1-P} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \dots + \beta_i X_i$$

Ecuación 1-1. Ecuación general del modelo de regresión logística

Donde,

- P es la probabilidad de $y = 1$
- $1-P$ es la probabilidad de $y = 0$
- y es la variable dependiente D_{via}

- $X_1 \dots X_i$ son las variables explicativas
- β_0 es el Intercepto
- $\beta_1 \dots \beta_i$ son los coeficientes de la regresión de $X_1 \dots X_i$


En regresión logística existe una medida para expresar la razón de las probabilidades calculada para cada variable explicativa en función de la variable a explicar (sin requerir supuestos especiales). Esta medida se denomina razón de probabilidades u Odds Ratio (Kleinbaum y Klein, 2010).





1.3. Patrones espaciales de ocupación

Los patrones espaciales indican la configuración de entidades y objetos a través del comportamiento de los fenómenos geográficos y de diferentes distribuciones o periodos de tiempo (ESRI, 2025). Son comúnmente usados para entender la evolución temporal de los cambios y la forma en que se transforma el paisaje producto de la ocupación y la consolidación de la red vial.

Los patrones espaciales de ocupación presentan una tipología, que se aborda a través del análisis espacial exploratorio de la distribución y forma de los polígonos y patrones de ocupación descritos en la literatura, como la tipología de ocupación desarrollada en los estudios de (Körting et al., 2008; Gavlak et al., 2011; Figueiredo et al., 2024), que exponen e identifican los patrones difuso, lineal, espina de pescado, multidireccional y consolidado (Tabla 1-1)

Tabla 1-1. Tipología de los patrones asociado a procesos de ocupación, gris = transformado (adaptado de Gavlak et al., 2011; Figueiredo et al., 2024)

Patrón	Tipología	Descripción	Patrón de ocupación
	Difuso	- Pequeños parches - Aislados - Distribución uniforme - Mediana densidad	Ocupación inicial espontánea, distribuida a lo largo de los bordes de río, y cultivos de coca.

	<p>Lineal</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Parches alargados continuos - Unidireccional 	<p>Ocupación inicial distribuida a lo largo de carreteras o acceso viales. En algunos casos bordes de ríos.</p>
	<p>Espina de pescado</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Parches largos y ramificados a lo largo de carreteras y ríos 	<p>Etapa intermedia de ocupación, en donde predominan las carreteras</p>
	<p>Multidireccional</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pequeños y medianos parches que se unirán - Forma diversificada o irregular - Media o alta densidad - Multidireccional 	<p>Etapa intermedia o avanzada de ocupación de forma desordenada</p>
	<p>Consolidado</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Grandes y continuos parches - Baja densidad de pequeñas áreas de bosque remanente - Parches compactos y continuos 	<p>Alta densidad de áreas transformadas y pocos fragmentos de bosque</p>

La identificación de los patrones espaciales se determina por medio del cálculo de las métricas del paisaje las cuales son una herramienta útil para los análisis de ecología del paisaje, por lo que se emplea la metodología de tipología de patrones espaciales derivada del análisis de estas métricas desarrollada por (Körting et al., 2008; Gavlak et al., 2011 y Figueiredo et al., 2024) en la Amazonia brasilera. Resaltando los patrones lineal y espina de pescado como los que más relación tiene con la construcción de carreteras a través del tiempo.

- **Métricas del paisaje**

Las métricas del paisaje son unidades cuantitativas que se usan para describir y analizar la estructura de un paisaje y son clave para la ecología del paisaje y el análisis de patrones espaciales (McGarigal et al., 1995). Las métricas se agrupan en varias categorías según el aspecto de la estructura del paisaje; métricas de parche y métricas de clase. Por lo que se encuentran las siguientes métricas: De área, densidad, tamaño y variabilidad de parches, borde, forma, área central, vecino más cercano, diversidad y yuxtaposición (McGarigal et al., 1995).

Acorde a la tipología de los patrones de ocupación, y teniendo como base la metodología para detectarlos en la Amazonia brasilera (Figueiredo et al., 2024) se calculan las siguientes métricas de los polígonos que conformaron el paisaje: Perímetro, Área, Relación Perímetro - Área, Índice de Forma, Índice de Dimensión Fractal, Relación Círculo Circunscripto y Radio de Giro. Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Métricas del paisaje. (Adaptado de Silva, Körting et al., 2008)

Métrica	Rango	Significado
Perímetro	$0 < PER < \infty$	Perímetro de una clase de cobertura, incluyendo todos los agujeros internos
Área (AREA)	$0 < AREA < \infty$	Área interna de la clase de cobertura
Relación Perímetro - Área	$0 < PARA < \infty$	Medida simple de complejidad de la forma
Índice de Forma	$1 \leq FORMA < \infty$	Es igual a 1 cuando el objeto del paisaje es totalmente compacto (totalmente cuadrado) y aumenta a medida que el objeto del paisaje se vuelve más irregular.
Índice de Dimensión Fractal	$1 \leq FRAC \leq 2$	Los valores cercanos a 1 se dan para objetos con perímetros simples (cuadrados) y los más cercanos a 2 para formas más complejas.
Relación Círculo Circunscripto	$0 \leq CIRCULO < 1$	Proporciona una medida de la elongación general del objeto del paisaje.
Radio de Giro	$0 \leq GIRO < \infty$	Se hace mayor en la proporción en que crece la extensión del objeto del paisaje.

Para el cálculo de las métricas del paisaje se emplea el software TerraView con el plugin (Extensión) Geographical Data Mining Analyst (GeoDMA), un clasificador desarrollado por (Körting et al., 2008), que permite la clasificación estructural de objetos mediante la extracción de un conjunto de métricas del paisaje que miden y describen los patrones espaciales de ocupación.

1.4. Distancia euclidiana

La distancia euclidiana es una medida en línea recta entre dos puntos en un espacio euclidiano y su fórmula está basada en el Teorema de Pitágoras de la siguiente manera (Altawell, 2021):

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Ecuación 1-2. Ecuación general distancia euclidiana

Para el análisis geográfico de dimensión ráster, se calcula la distancia desde cada celda en el ráster hasta el origen (eje vial) más cercano. Figura 1-2.

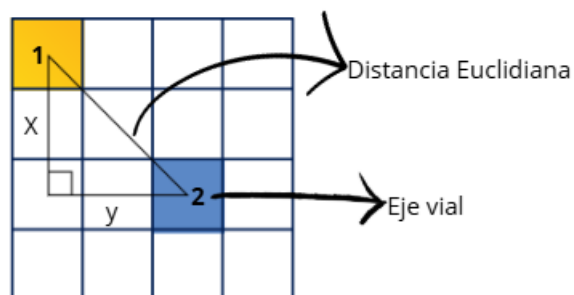


Figura 1-2. Representación distancia euclidiana con origen vial en un ráster

1.2 Revisión de la literatura

Para cumplir con el objetivo 1 del presente estudio, se consultó la base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas Scopus; propiedad de Elsevier, con el objetivo de identificar la producción científica relacionada a las transformaciones que generan las vías en el paisaje y los procesos de ocupación en la Amazonia colombiana con palabras claves como: “*deforestation, models, amazon, land change cover, road, occupation*”. Estas palabras claves se determinan acorde a lo siguiente: “*deforestation*” es el mayor proceso de transformación en la Amazonia (Katz-Asprilla et al., 2024; Berenguer et al., 2024); “*models*” se debe a que el modelamiento espacial o geoestadístico es la herramienta para abordar los análisis de las dinámicas espacio-temporales que busca determinar la relación de un conjunto de variables espaciales explicativas (Camacho, 2022); “*amazon*” es el área geográfica en donde se desarrolla el análisis del trabajo; “*land change cover*” permite analizar los cambios en la cobertura terrestre - la sustitución completa de un tipo de cobertura por otro- (Lambin et al., 2003); “*road*” es la variable a la que se le quiere explicar la relación con los cambios de cobertura y su influencia en la deforestación; “*occupation*” es una de las principales causas de los procesos de transformación de las coberturas (Lambin et al., 2003) .

Se empleó un software de análisis de redes bibliométricas llamado VOSviewer desarrollado por el Centro de Estudios de Ciencia y Tecnología (CWTS), para construir y visualizar redes bibliométricas a partir del uso de métodos matemáticos y estadísticos a la base de datos de revistas y artículos científicos como Scopus, generando mapas de redes a partir de palabras clave, autores, citas, etc. Con el apoyo de esta herramienta, se realizó una primera búsqueda con las palabras “*models, amazon, land change cover*”, que arrojó 348 artículos, predominando Brasil como área de estudio principal, con 139 ocurrencias, mientras que Colombia mostró 11 artículos. Se obtuvo como resultado el siguiente análisis de redes a la base bibliográfica (Figura 1-3).

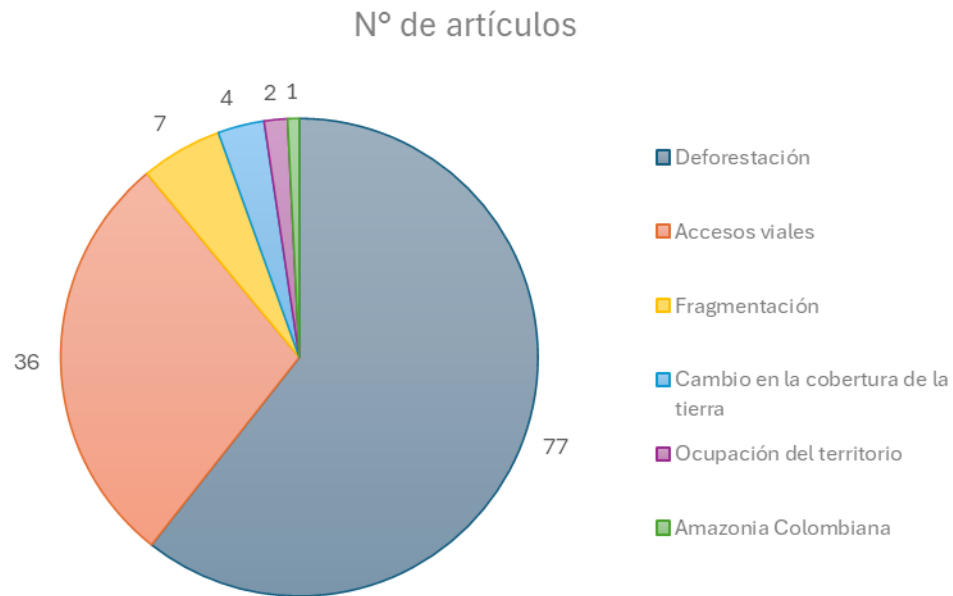


Figura 1-5. Artículos relacionados con los accesos viales en la Amazonia

Para la categoría deforestación, se encontró que 77 artículos están relacionados con motores de la deforestación y cambio de uso del suelo en la Amazonia brasilera (Laurance et al., 2002; Aguiar et al., 2007; Leal et al., 2016; Guerra et al., 2020). En cuanto a los accesos viales, predomina la construcción de carreteras (Perz et al., 2008; Fearnside, 2015), las evaluaciones ambientales para modelos viales (Morais et al., 2023), modelamientos y mapeo de predicciones (Dalagnol et al., 2023). Sin embargo, ningún estudio ha sido realizado explícitamente para la Amazonia colombiana, esto se aborda de manera muy sucinta en estudios de cambios de cobertura y uso del suelo y el análisis sobre impactos en los bosques intactos (Armenteras et al., 2019). (Figura 1-6)

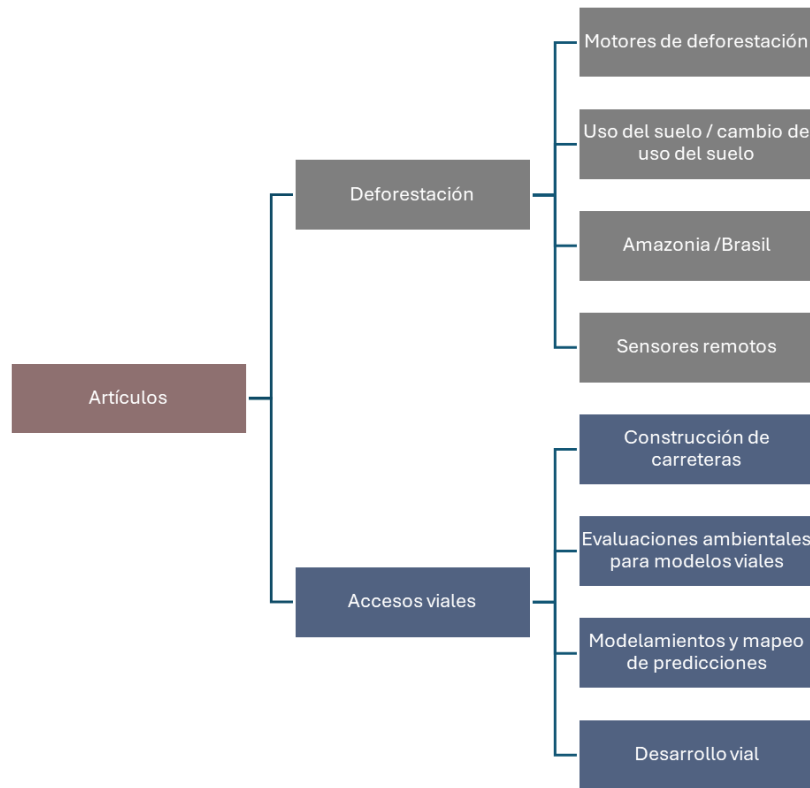


Figura 1-6. Árbol de clasificación de artículos para deforestación y accesos viales

Para la categoría fragmentación, los estudios se centran en escenarios de deforestación (Tejada et al., 2016) y cambio climático (Cochrane y Barber, 2009; Perz et al., 2008). En cuanto a cambio en la cobertura de la tierra, se centró en simulaciones y modelamientos de las dinámicas y motores de deforestación para Brasil (Soares-Filho et al., 2004; Kazadi y Yoshikawa, 2009; Yoshikawa y Sanga-Ngoie, 2011; Rosa et al., 2015). En el tema de ocupación del territorio, la aproximación está en los artículos de procesos de colonización, procesos agrícolas (Murphy, 2001; Kaced et al., 2019). Finalmente, los estudios desarrollados con ámbito geográfico en la Amazonia colombiana para los accesos viales se enfocó en la identificación de patrones regionales para el uso del suelo agrícola y la deforestación (Etter et al., 2006), y en las causas y motores para la deforestación, dejando de forma somera los accesos viales (Agudelo-Hz et al., 2023, Armenteras et al., 2019) lo que demuestra que existe una limitada literatura sobre los estudios de los accesos viales como elemento transformador del paisaje en la Amazonia colombiana. (Figura 1-7)

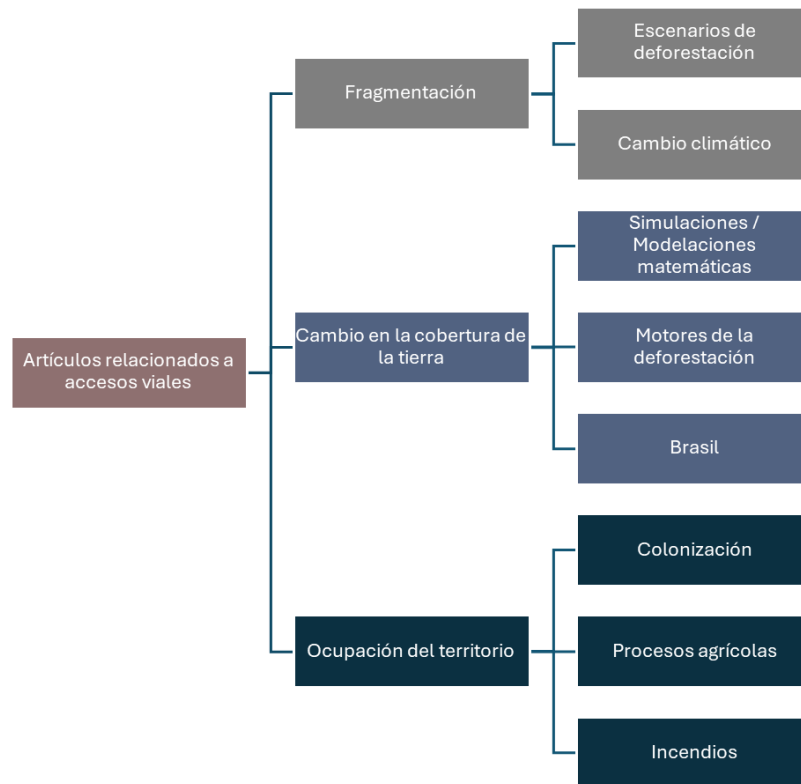


Figura 1-7. Árbol de clasificación de artículos para fragmentación, cambio en la cobertura de la tierra y ocupación del territorio

1.3 Antecedentes

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático - COP 26, líderes mundiales de 137 países dieron un paso histórico al comprometerse a detener y revertir la pérdida de bosques y la degradación de las tierras a 2030 (Naciones Unidas, 2022), por lo que se necesitan urgentemente enfoques innovadores para la protección de los bosques (Ball et al., 2022). Se estima un aumento de temperatura entre 2°C y 3°C haría irreversibles los riesgos de extinción de especies y pérdida de biodiversidad en los ecosistemas, con alto impacto en las regiones tropicales, lugar en dónde se concentra la mayor pérdida y degradación del planeta (IPCC 2023).

La pérdida de los bosques es difícil de predecir porque resulta de interacciones complejas dentro de sistemas humano-ecológicos que van cambiando por los efectos e impactos en las dinámicas ambientales. En el caso de las vías, se ha identificado la facilidad de acceso como un factor característico que genera cambios y transformación del paisaje a mayor velocidad (Geist y Lambin, 2002). Las vías constituyen un predictor significativo de la deforestación futura, ya que impulsan y facilitan otros procesos como la ocupación y las actividades productivas y extractivas (Barber et al., 2014). Igualmente, generan cambio directo en las coberturas y uso del suelo, manifestándose en procesos de deforestación y fragmentación del paisaje (Lambin et al., 2003). Estas relaciones se pueden analizar geográficamente, por medio de variables económicas, sociales y ambientales (por ejemplo, la distancia a las vías, los precios de la tierra - ocupación); dentro de un marco estadístico, mostrando las relaciones entre variables que explican la probabilidad de la deforestación del paisaje en un lugar determinado (Cushman et al., 2017; Ball et al., 2022). En el bioma amazónico brasilero, se ha identificado que el 95% de la deforestación se localiza en los primeros 5.5 km de una carretera oficial y no oficial y a 1 km de un río, mostrando una acumulación rápida de deforestación en ese rango (Barber et al., 2014), eso indica el alto nivel de transformación que genera la existencia de una vía en un ecosistema natural. La selva amazónica alberga más de la mitad de los bosques húmedos tropicales del planeta, y representa el 44% de la superficie de América del Sur, conformada por los países de Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Guyana, Perú, Suriname y Venezuela (OTCA, 2025), los cuales, desde los años sesenta han pasado por fuertes procesos de transformación, generados por modelos de ocupación del territorio amazónico, orientados en la visión de desarrollo extractivista que busca el crecimiento económico con los usos intensivos de los recursos oro, petróleo, madera y pescado.

Para Colombia, existen diversos estudios que analiza el cambio de cobertura y uso del suelo, manifestados a partir de procesos de deforestación que aborda motores como la agricultura (Etter et al., 2006), la accesibilidad por ríos y carreteras, los factores biofísicos y los centros poblados (Etter et al., 2008), los pastos y cultivos (Agudelo-Hz et al., 2023), entre otros; mientras que para la Amazonia colombiana, existen estudios que afirman que para la década del año 2000 los caminos de acceso no tenían relación con la deforestación, como sí lo eran en su momento los accesos fluviales (Armenteras et al., 2006). Sin

embargo, para periodos más actuales los estudios se han centrado en los cambios de cobertura relacionados con los escenarios de posconflicto y paz (Murillo-Sandoval et al., 2022; Agudelo-Hz et al., 2023), en modelamiento de causas y motores de la deforestación mostrando que la investigación de las transformaciones del paisaje por los accesos viales es incipiente. Sin embargo, los accesos viales son tomados como una variable para explicar que la distancia a las carreteras es importante para la degradación y la fragmentación forestal en el noroeste de la Amazonia colombiana (Armenteras et al., 2019). Ya que la Amazonia colombiana no es ajena a complejos procesos de ocupación, derivados de cambio de cobertura y uso del suelo que ha generado múltiples consecuencias en los bosques y la biodiversidad, como indica el IDEAM (2024) cerca del 65% de la deforestación nacional entre 2016 y 2023 se concentra en esta región (800.000 hectáreas), en donde los ríos y las vías son una forma importante de conexión sistemática entre los territorios alejados con transporte limitado que propician cambios en la cobertura y uso de suelo (Etter et al., 2006; Bax et al., 2016).

Acorde a lo anterior se hace necesario un análisis que muestre la relación que hay entre los accesos viales con la transformación del paisaje amazónico colombiano, ya que se generan cambios en la cobertura de la tierra, impulsando los procesos de pérdida de bosque (Camacho, 2022).

2. Capítulo 2: Metodología

2.1 Tipo de investigación

La metodología empleada para analizar la transformación del paisaje en la Amazonia colombiana es de tipo cuantitativa, centrada en la identificación y análisis de variables que explican los cambios en la cobertura y uso del suelo, particularmente en áreas afectadas por el desarrollo de infraestructura vial, teniendo en cuenta que los análisis y espacios geográficos se abordan en procedimientos de la matriz espacial y las correlaciones de variables incluidas en ella (Buzai, 2024). Esta metodología involucra la recolección de datos provenientes de fuentes oficiales y no oficiales, incluyendo técnicas como la teledetección que a partir del uso de imágenes satelitales que permiten obtener una visión detallada de los cambios de uso y cobertura del suelo (Tempa et al., 2024). Posteriormente, se aplica un análisis estadístico mediante técnicas como la regresión logística (Kleinbaum y Klein, 2010) y el análisis espacial multitemporal y de clasificación estructural entrenada de objetos a partir de las métricas del paisaje (Körting et al., 2008), para identificar patrones y procesos relacionados con la expansión vial y su impacto sobre el entorno. Esta aproximación proporciona una base científica sólida para la toma de decisiones en la gestión del territorio y el diseño de políticas de conservación y desarrollo sostenible.

2.2 Diseño de la investigación

Se construye una metodología basada en modelo de cascada o de vida secuencial en donde se determina que una fase debe ser finalizada antes de comenzar la otra en secuencia lineal, muy comúnmente usada para la gestión de proyectos de ingeniería (Senarath, 2021), para analizar la influencia de las vías en la transformación del paisaje en la Amazonia colombiana que sigue una secuencia de fases, Figura 2-1, iniciando con la

delimitación del caso de estudio y la definición del área geográfica en función del cubrimiento de las variables a analizar, asegurando que los datos recopilados reflejen de manera precisa los efectos de la infraestructura vial sobre la transformación del paisaje. La selección del área debe considerar aspectos como el inventario de la red vial existente, los cambios históricos en la cobertura del suelo y la pérdida de bosque por medio de los denominados núcleos de deforestación. Para ello, se hace uso de información geoespacial proveniente de imágenes satelitales, bases de datos geográficas y estudios previos que han documentado el proceso de transformación territorial en la región.

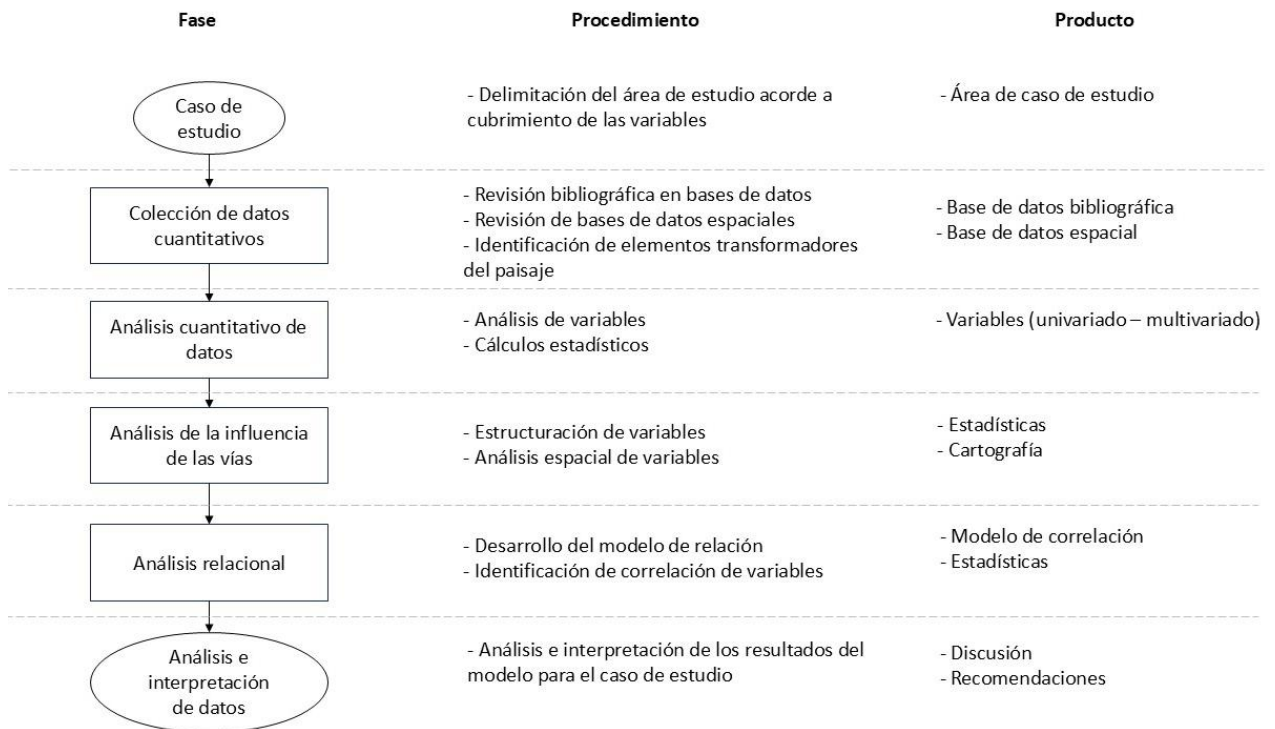


Figura 2-1. Metodología del estudio

Posteriormente, se realiza la delimitación del área de estudio que es un paso fundamental, ya que permite acotar los análisis dentro de un contexto (MADS, 2024) y situaciones específicas del territorio amazónico. Una vez establecida el área de estudio, se procede a la recolección y análisis de datos cuantitativos, los cuales constituyen la base empírica para evaluar la relación de las vías con la transformación del paisaje y las variables que lo explican, este proceso incluye la revisión de literatura científica en bases de datos

especializadas como Scopus, con el fin de contextualizar el problema y reconocer metodologías previas aplicadas en estudios similares. Con estos insumos, se identifican y estructuran las variables de análisis, como la proximidad o influencia a las vías, la fragmentación del paisaje y el cambio de uso del suelo, a las cuales se hará un análisis estadístico que permite cuantificar las relaciones entre estas variables, utilizando métodos de regresión univariados y multivariados que revelan patrones de cambio en diferentes escalas espaciales y temporales, se elabora cartografía temática para visualizar los cambios ocurridos en el paisaje y facilitar la interpretación de los datos obtenidos.

Finalmente, en la fase de análisis relacional, se busca establecer un modelo de correlación espacial entre la red vial y las demás variables asociadas a transformaciones del paisaje amazónico y a partir del análisis espacial multitemporal y por tipología de patrones, se identifican los patrones de cambio que pueden estar asociados con la apertura de nuevos accesos viales, la ampliación de vías existentes o la ocupación de ciertas zonas en el territorio. La interpretación de estos resultados es clave para generar recomendaciones orientadas a una planificación territorial sostenible, minimizando los efectos negativos sobre los ecosistemas amazónicos y poder contribuir a la formulación de políticas públicas que regulen el desarrollo vial en la región en donde se promueva la implementación de Lineamientos de Infraestructura Verde Vial (MADS, 2020), generando estrategias de mitigación que reduzcan la presión sobre los ecosistemas y fomenten alternativas de desarrollo compatibles con la conservación y el ordenamiento ambiental del territorio tal como debe ser abordado por los Planes de Desarrollo Vial de los departamentos y municipios amazónicos.

2.3 Definición del área de estudio

El área de estudio, con una extensión de 14 millones de hectáreas aproximadamente, se localiza en la Amazonia colombiana y cubre los departamentos de Putumayo, Caquetá, Guaviare y el sur del Meta, allí se concentra cerca del 65% de la deforestación del país y según el IDEAM (2023), se identificaron 5 núcleos nacionales de deforestación, todos ellos

localizados en la zona denominada el “Arco de deforestación amazónica”. El crecimiento vial en esta zona para el año 2022, identifica 26.915 km de vías en los que 742 km corresponden a trazados de nuevas vías entre los años 2021 y 2022; las cuales están ingresando a áreas de importancia y restricción ambiental como el Parque Nacional Natural Tinigua, Parque Nacional Natural Sierra de la Macarena, Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete, Parque Nacional Natural La Paya y la Reserva Nacional Natural Nukak; igualmente varios resguardos indígenas en los que sobresale el Resguardo Indígena Llanos del Yará – Yaguara II y el Resguardo Indígena Nukak, ya que son los más afectados por la deforestación y el crecimiento vial; y la Reserva Forestal de la Amazonia de Ley 2da de 1959, acelerando la pérdida de los ecosistemas boscosos y naturales (FCDS, 2022).

Para la delimitación del área de análisis se usaron técnicas cartográficas, como álgebra de mapas y se definió a partir de las siguientes capas espaciales: Focos de deforestación 2023 (IDEAM, 2024), cuencas hidrográficas (MADS, 2021b) y límites municipales (IGAC, 2025). Como resultado el límite queda de la siguiente manera, Figura 2-2: Al norte limita con los municipios de San Juan de Arama, Puerto Concordia y Mapiripán (Sur del Meta); por el oriente con los municipios de San José del Guaviare, El Retorno y Miraflores (Guaviare), y las cuencas de los ríos Guayabero y Ariari; por el sur con los municipios de Miraflores (Guaviare) y Puerto Leguízamo (Putumayo), y las cuencas de los ríos Itilla, Tunia, Ajaju, Camuya, Yará, Caguán, Caquetá; por el occidente con los municipios de San Vicente del Caguán, Cartagena del Chairá, Solano y Puerto Leguízamo. Esta área incluye los focos de deforestación Mapiripán, Guaviare – Calamar-Miraflores, Resguardo Llanos del Yará – Yaguara II, Sabanas del Yará – Caguán y Putumayo.

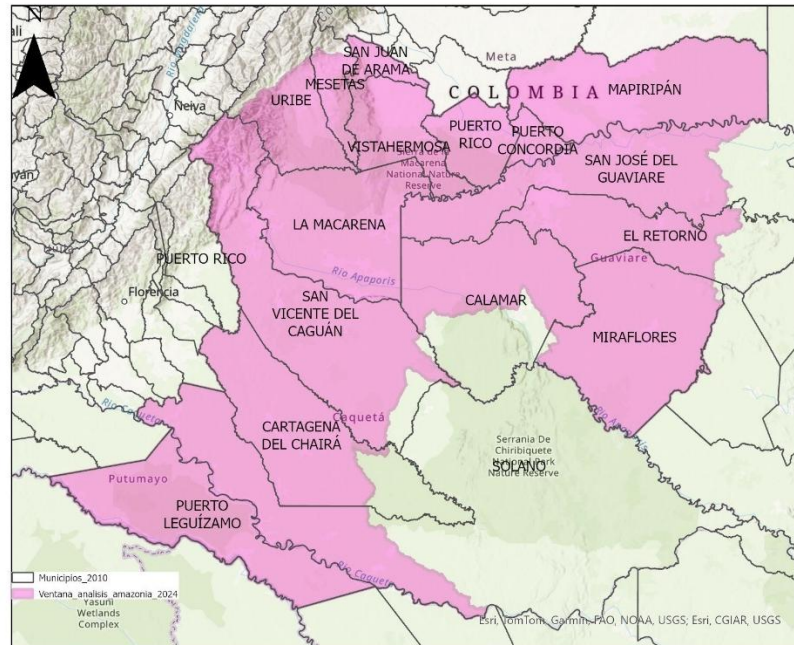


Figura 2-2. Mapa del área de estudio

2.4 Técnicas de análisis de datos

Para analizar la influencia de las vías en la transformación del paisaje en la Amazonia colombiana, es fundamental emplear diversas técnicas de análisis de datos que permitan evaluar de manera precisa las relaciones espaciales y estadísticas entre la infraestructura vial y los cambios en la cobertura del suelo. Una de las principales herramientas utilizadas es el análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), el cual facilita la integración, visualización y procesamiento de datos geospaciales (Goodchild et al., 2005), y permite varios análisis como el cálculo de proximidad o distancia a un evento, y análisis de patrones de cambio espacial, para identificar zonas con mayor impacto de la expansión vial sobre el paisaje. Entre las técnicas más relevantes se encuentran el análisis de proximidad - distancia euclidiana - (Altawell, 2021), que permite evaluar cómo la cercanía a las vías influye en la transformación del territorio, y la detección de cambios de cobertura mediante imágenes satelitales de diferentes períodos, esto permite cuantificar la

tasa de deforestación (Cochrane y Barber, 2009), y la expansión de áreas con ocupación o con actividades agropecuarias.

Además del análisis espacial, se emplean pruebas estadísticas como la Regresión Logística (Kleinbaum y Klein, 2010), para establecer relaciones de probabilidad de ocurrencia entre la presencia de vías y las variables que indican cambios en el uso del suelo. Adicionalmente, el uso de modelos de correlación, como el coeficiente de Spearman (Mendivelso y Rodríguez, 2022), permite evaluar la fuerza y dirección de la relación entre la presencia vial y las variables que generan cambios de cobertura y uso del suelo. Otra técnica relevante es el análisis de series temporales y métricas del paisaje (McGarigal et al., 1995), que ayuda a la identificación de tendencias y patrones en la expansión de la infraestructura vial y sus efectos sobre los ecosistemas boscosos (Körting et al., 2008). La combinación de estas metodologías proporciona una visión integral del impacto de las vías en el paisaje amazónico, permitiendo generar estrategias de manejo sustentable del territorio.

2.5 Datos y variables

Para realizar el análisis de las vías como elemento transformador del paisaje se hace una revisión bibliográfica en Scopus de los artículos e investigaciones asociadas al cambio de cobertura y uso del suelo, y deforestación, con un enfoque multidisciplinario, donde se integran aspectos ecológicos, sociales, económicos y tecnológicos. En los estudios sobre deforestación, las tasas de cambio en la pérdida de bosque son una variable clave, generalmente obtenidas a través de análisis de imágenes satelitales y sensores remotos (IDEAM, 2014). Entre los factores que inciden en la deforestación, destacan las actividades agrícolas, la ganadería, que sigue siendo uno de los principales motores de la conversión de tierras forestales en muchas regiones del mundo (IPBES, 2019). Además, los artículos científicos examinan cómo la ocupación, la construcción de carreteras y otras infraestructuras facilitan el acceso a zonas remotas, lo que a su vez acelera el proceso de deforestación.

Se hizo una revisión deductiva y exhaustiva de la literatura que identificó 8 estudios con temporalidad distinta, comenzado con una escala mundial hasta llegar a la escala de trabajo que comprende la Amazonia colombiana, allí mencionan los accesos viales como un impulsor importante en los procesos de cambio de uso del suelo y la deforestación. La Tabla 2-1, muestra las variables identificadas en cada uno de los estudios analizados, asociadas a un tema principal allí mencionado.

Tabla 2-1. Variables en los estudios

Bibliografía	Temas	Capas
Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation Geist y Lambin (2002)	Ampliación de infraestructura	Carreteras
		Asentamientos
		Pozos hidrocarburos
	Expansión Agrícola	Explotación Minera
		Cultivos lícitos e ilícitos
Quemas		
Extracción de madera	Ganadería	
Otros factores	Tala selectiva	
Global assessment report on biodiversity and ecosystem services IPBES (2019)	Causas directas cambio uso del suelo sectorial	Orden público
		Pesca
		Agricultura, pastos y ganadería
		Plantaciones Forestales
		Plantaciones no forestales
		Minería
		Represas y carreteras
		Turismo
	Causas directas de los impactos agregados de todas las acciones sobre la naturaleza	El transporte de mercancías
		Extracción ilegal de recursos
Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon Barber, C. P., Cochrane, M. A 2014	Causa directa	Expansión urbana
		Carreteras no oficiales
Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon Laurance, W. F., Albernaz, A. K. M., Schroth, G (2002)	Factores demográficos humanos	Ríos
		Densidad de población rural
	Factores que afectan la accesibilidad física a los bosques	Tamaño de población urbana
		Distancias lineales a la carretera pavimentada más cercana
		Camino sin pavimentar
	Factores que pueden afectar la idoneidad del uso de la tierra para la ocupación humana y la agricultura	Río navegable
		Lluvia anual
		Severidad de la estación seca
		Fertilidad del suelo
		Encharcamiento del suelo
	Deforestación	Profundidad del suelo
		Deforestación
		Cobertura de la tierra: bosque, agua, áreas de luz persistente en la noche (ciudades) y áreas no forestadas

(Continúa Tabla 2-1)

Bibliografía	Temas	Capas
Rapid loss in landscape connectivity after the peace agreement in the Andes-Amazon region Murillo-Sandoval y Clerici (2022)	Conflicto armado (Causas Subyacentes)	Deforestación interanual
Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon Armenteras D., Rudas (2006)	Accesibilidad	Ríos
	Población humana	Centros poblados
	Uso y tenencia de la tierra	Ganadería (pastos) Cultivos de coca
	Multi temporal de deforestación	Deforestación
Scenarios of land use and land cover change for NW Amazonia: Impact on forest intactness Armenteras, D., Murcia, U 2019	Expansión agrícola	Tierras cultivadas
		Pastos
		Distancia Incendios
		Cultivos de uso ilícito
	Desarrollo de infraestructura	Carreteras Ríos
	Extracción de recursos no renovables	Distancia sitios petroleros Distancia a zonas mineras
Impulsores indirectos	Distancia a asentamientos humanos	
Scenarios of land use and land cover change in the Colombian Amazon to evaluate alternative post-conflict pathways Agudelo-HZ, W. J., Castillo-Barrera, N. C., y Uriel, M. G. (2023)	Accesibilidad	Densidad de carreteras
		Distancia a centros poblados
		Distancia ríos principales
		Distancia a ríos secundarios
	Clima	Sensación a la temperatura
		Temperatura media
		Precipitación anual
	Características del paisaje	Fragmentación de bosques
		Distancia a pastos y herbazales
		Distancia a los bosques de llanuras aluviales
	Prácticas de producción y degradación ambiental	Densidad ganadera
		Densidad de incendios
		Distancia a cultivos ilícitos
		Distancia a pastos y cultivos
		Distancia a zonas agrícolas aisladas (enclaves)
		Distancia del avance del paisaje agrícola
		Distancia a zonas agrícolas conectadas
	Distancia a zonas con títulos mineros	
	Socioeconomía	Densidad de población
		Producto interno bruto
		Índice GINI
		Distancia a resguardos indígenas
	Gestión del paisaje	Estado legal del territorio
		Distancia a Parques Nacionales Naturales Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP)
Distancia a Resguardos Indígenas		
Distancia a las áreas de sustracción de la reserva forestal (Ley 2ª)		
Características del suelo	Distancia a áreas de reserva forestal en la Amazonia (Ley 2ª)	
	Calidad de drenaje del suelo	
	Tipos de paisaje fisiográfico	

2.5.1 Priorización de las variables

Acorde al listado de variables se determinó la priorización teniendo en cuenta como indicador, el número de veces que se mencionaba e incluía cada variable en el estudio (ocurrencia de palabras) con base en la metodología de priorización de la investigación (Hernández-Nariño et al., 2021). Esto arrojó que los accesos viales y los asentamientos (poblamiento) está presente en el 75% de los estudios, seguido por los cultivos ilícitos y los río en 63 % de los estudios, mientras que la ganadería y la explotación minera se encuentran en el 50% de los estudios. La Figura 2-3, muestra la distribución de la priorización de cada una de las variables, agrupando por color y tamaño la cantidad de veces que aparece en los estudios.

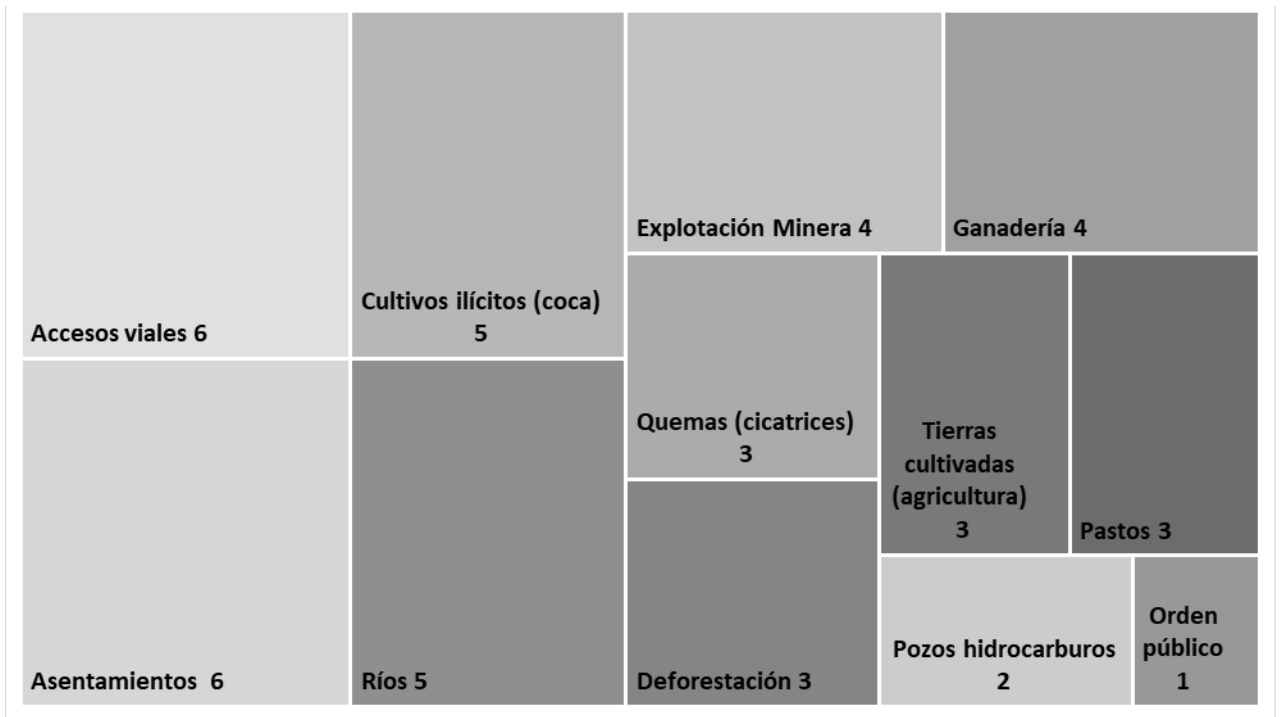


Figura 2-3. Priorización de las variables

De la evaluación de la priorización, se puede determinar que los accesos viales son un impulsor importante para analizar la transformación del paisaje y el cambio de cobertura y uso del suelo en la Amazonia. Acorde a lo anterior se establece el siguiente listado de

variables las cuales son la base para el análisis y desarrollo de los objetivos 1 y 3 del presente estudio, partiendo de una búsqueda de información espacial en fuentes oficiales, bajo los siguientes criterios: espacializable, temporalidad 2022 – 2024, escala mínima 1:100.000 y cubrimiento en la ventana de análisis. (Anexo A)

- ✓ Accesos viales
- ✓ Asentamientos (centros poblados)
- ✓ Pozos hidrocarburos
- ✓ Explotación minera (títulos mineros)
- ✓ Cultivos de coca
- ✓ Quemadas
- ✓ Ganadería
- ✓ Accesos fluviales (ríos)
- ✓ Deforestación
- ✓ Tierras cultivadas
- ✓ Pastos

2.6 Análisis de datos

Para cumplir con el objetivo 2 - Analizar la influencia en la transformación del paisaje generada por los accesos viales -, se realizó un análisis basado en la distancia euclidiana (Altawell, 2021) que hay entre los abiertos de deforestación y los ejes viales, con el objetivo de calcular la influencia o proximidad que tienen las vías sobre la pérdida de cobertura boscosa (Cochrane y Barber, 2009), este objetivo se cumplió de primero ya que el cálculo de la distancia de proximidad fue insumo importante para establecer el área de las muestras del modelo de análisis de relación basado en accesos viales. Los datos usados se abordaron mediante la elaboración de un archivo ráster continuo con tamaño de píxel de 30x30 metros y proyección geográfica plana con sistema de coordenadas (UTM - Universal Traversa de Mercator 18 Norte), que almacenaba en cada píxel, la información para cada una de las variables de deforestación y distancia a los ejes viales. esto permitió trabajar con datos provenientes de diferentes geometrías (puntos líneas y polígonos) ya

que facilitó la comparación de variables en el espacio muestral, solucionando el problema multiescalar que presentaban las variables.

Finalmente, para cumplir con el Objetivo 1 - Identificar la relación entre los accesos viales y el cambio de uso y cobertura del suelo, considerando los patrones y procesos de ocupación del territorio – y 3 - Implementar un modelo que permita analizar las relaciones entre accesos viales, ocupación del territorio y dinámicas de transformación en el contexto amazónico colombiano-, se realizó un análisis estadístico de los datos mediante un conjunto de técnicas y métodos que permiten explorar, analizar, modelar y visualizar datos espaciales, con el objetivo de entender patrones, distribución espacial de fenómenos, relaciones y procesos que ocurren en el área de estudio (Acevedo et al., 2008).

Para realizar el análisis cuantitativo y facilitar el cálculo se empleó una cuadrícula de 1x1 kilómetros que almacenaba la información de cada una de las variables (Anexo A) objeto de estudio de los datos se usó el software libre R, que es un entorno y lenguaje de programación para computación estadística y gráficos, que permitió trabajar en entornos agrupados “*Data Frame*” o “*Marco de datos*” los cual es apropiado para estructuras de almacenamiento con múltiples variables. Las librerías usadas para los análisis fueron las siguientes:

- ✓ raster: Lectura, escritura, manipulación, análisis y modelado de datos espaciales.
- ✓ sf: Forma estandarizada de codificar y analizar datos vectoriales espaciales.
- ✓ dplyr: Una herramienta rápida y consistente para trabajar con objetos similares a marcos de datos, tanto en memoria como fuera de ella.
- ✓ glmmTMB: Ajuste de modelos lineales y lineales mixtos generalizados con diversas extensiones, incluyendo la inflación cero. Los modelos se ajustan mediante estimación de máxima verosimilitud mediante 'TMB' (Constructor de Modelos de Plantilla). Se asume que los efectos aleatorios son gaussianos en la escala del predictor lineal y se integran mediante la aproximación de Laplace. Los gradientes se calculan mediante diferenciación automática.
- ✓ car: Funciones para acompañar la regresión aplicada

Las pruebas estadísticas realizadas fueron las siguientes:

- Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov: Utilizada para comprobar la distribución normal de los datos. Esta prueba compara la función de distribución acumulada observada de una variable con una distribución teórica determinada (Sánchez-Solis et al., 2024).
- Matriz de correlación de Spearman: Es una matriz alfanumérica que indica la fuerza y dirección de la relación monótona entre múltiples variables, calculada mediante los rangos de correlación de Spearman. En lugar de usar los valores originales, se basa en la jerarquía (rango) de los datos, lo que la hace adecuada para datos ordinales o no distribuidos normalmente, y para detectar relaciones no lineales. Los valores en la matriz oscilan entre -1 (relación negativa fuerte) y +1 (relación positiva fuerte), con 0 indicando ausencia de relación. (Martínez et al., 2009)
- Índice de autocorrelación espacial de Moran (I Moran): Es un método estadístico para detectar la autocorrelación espacial en los datos, si los valores de una variable se agrupan, se dispersan o son aleatorios en el espacio. Un valor de I de Moran positivo indica que las áreas con valores altos o bajos tienden a agruparse, mientras que un valor negativo señala un patrón de dispersión o aleatoriedad. (Chen, 2023)

Para ajustar el modelo (Bondad del ajuste) obtenido y saber que tanto se ajusta a los datos observados y si los valores esperados son cercanos a los observados, se realizaron las siguientes pruebas:

- Pseudo R-cuadrado de McFadden: Es una medida PRE (reducción proporcional del error). El valor mínimo de 0 significa que las variables independientes no mejoran la capacidad explicativa del modelo. El valor máximo de 1 se alcanza cuando el valor en el modelo con variables independientes (modelo final) es igual a 0 y, por lo tanto, no se producen errores de predicción. (Hartmann et al., 2023).
- Pseudo R-cuadrado de Cohen: Para evaluar la fuerza de la correlación, se suelen utilizar los límites sugeridos por Cohen. Según este, una correlación de $r = 0,10$ se considera débil, una de $r = 0,30$, media, y una de $r = 0,50$, fuerte. (Hartmann et al., 2023).

- Prueba Chi-Cuadrado: Compara las probabilidades observadas y esperadas de éxito y fracaso en cada grupo de observaciones. Valores pequeños del estadístico (o un valor p grande) implican que el modelo se ajusta satisfactoriamente a los datos. (Montgomery et al., 2012).
- Relación Devianza Residual / Grados de Libertad Residuales: Los residuos de desviación son útiles para comprobar el ajuste del modelo en puntos de datos individuales y para detectar posibles valores atípicos. (Montgomery et al., 2012).
- Área Bajo la Curva (AUC): El área bajo la curva es el área entre la gráfica de una función y el eje X dentro de un intervalo definido y ayuda a considerar que un modelo discrimina mejor que el azar si la curva se sitúa por encima de la diagonal de no discriminación, es decir, si el AUC es superior a 0,5. (Jiménez-Valverde, 2011)

Finalmente, se usó información multitemporal de la cobertura de la tierra de (SINCHI) para el periodo 2020 a 2024, y métricas del paisaje para clasificar por tipología los patrones y procesos de ocupación del territorio generados por la presencia de una vía. El proceso para clasificar los patrones de ocupación acorde a la metodología de (Körting et al., 2008) se basó en la selección de un conjunto de muestras de entrenamiento por cada tipología de patrón y se aplicó un algoritmo de árbol de decisión C5.0 descrito en (Quinlan 1994) e integrado en el plugin GeoDMA del software TerraView.

3. Capítulo 3: Resultados

3.1 Análisis de influencia / proximidad de las vías

Para cumplir con objetivo 2 - Analizar la influencia en la transformación del paisaje generada por los accesos viales, se partió del concepto de distancia euclidiana y se calculó para una matriz espacial conformada por celdas de 30 x 30 metros la distancia euclidiana al elemento más cercano a la red vial combinado con la variable de deforestación entre el periodo de 2018 a 2024, hasta una distancia máxima arbitraria de 95 km, siendo muy poco probable que exista alguna influencia en esa distancia máxima. En la Figura 3-1, se observa en tonalidades de verdes a rojos la distancia euclidiana de cada una de las vías, indicado en rojo la mayor cercanía y en verde las distancias más lejanas. El color negro muestra los polígonos de deforestación que se localizan sobre las tonalidades más rojas del mapa.

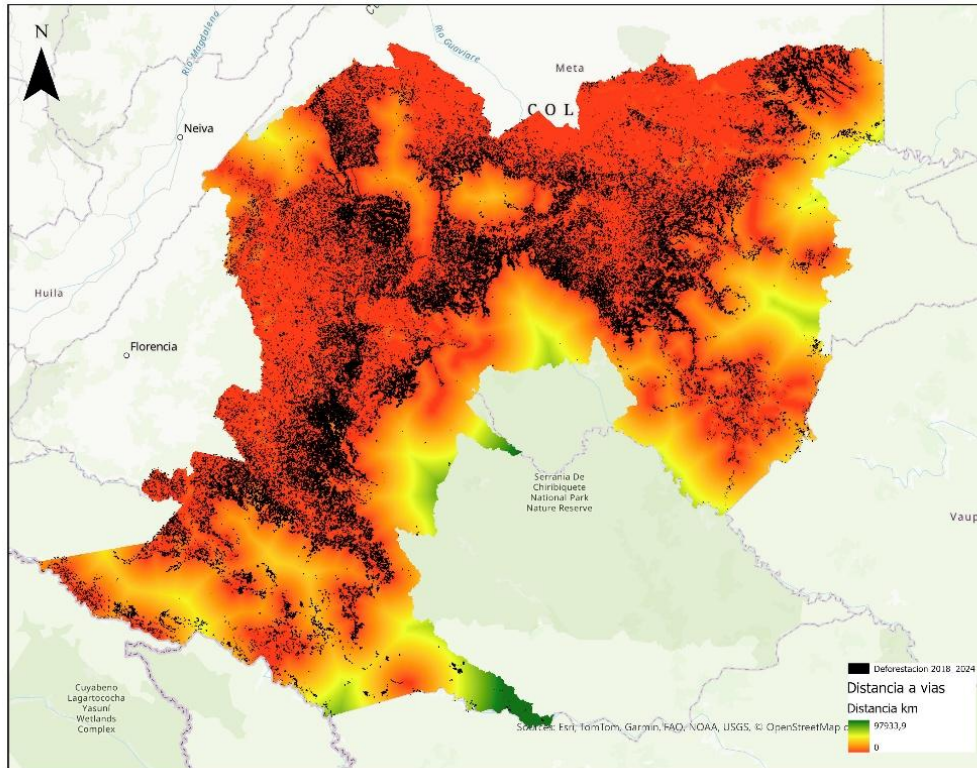


Figura 3-1. Distancia euclidiana a vías y deforestación

Espacialmente se elaboró una suma algebraica de mapas, para combinar la distancia euclidiana y los polígonos de deforestación y posteriormente, mediante un gráfico comparativo, se determinó cuantitativamente la distancia a la cual la deforestación disminuía la velocidad en la acumulación, por medio del cálculo del trazo de la curva de deforestación acumulada contra la distancia y estimando la pendiente de la curva a través de la línea de tendencia. El valor obtenido, se correlaciona con el dato de mayor acumulación de deforestación con valores próximos a las redes de transporte (acumulación rápida) y valores bajos en distancias extremas (acumulación lenta). La distancia a la cual la pendiente cambia de mayor a menor a uno se determinó como el punto donde la influencia comienza a disminuir (Figura 3-2)

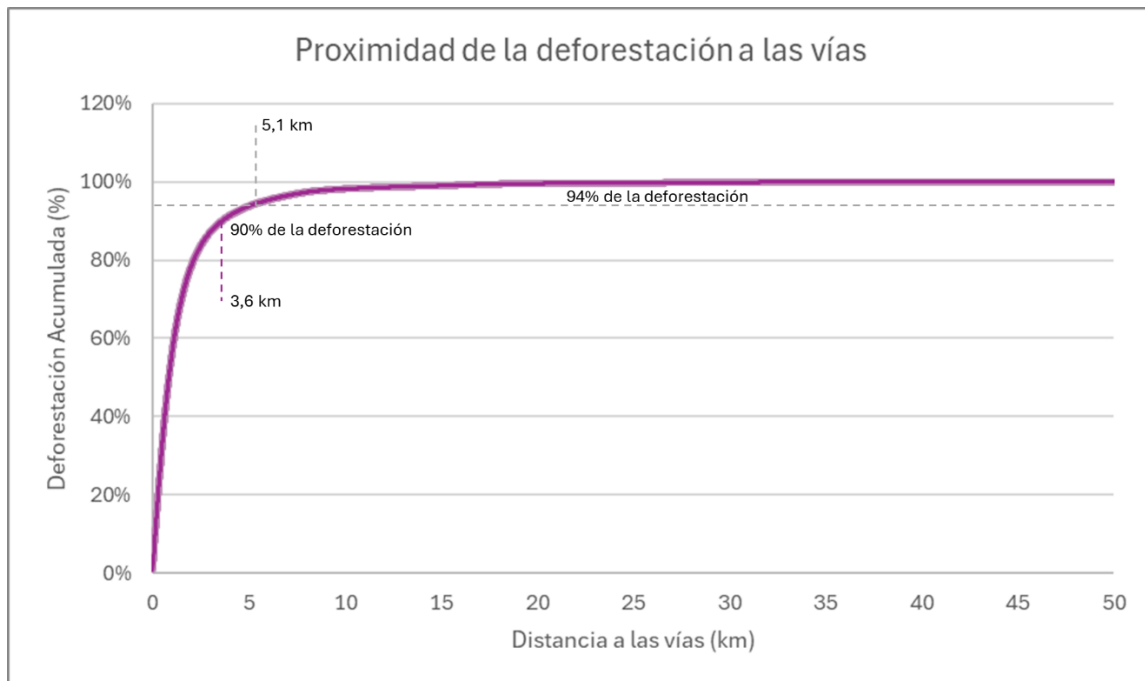


Figura 3-2. Proximidad de la deforestación acumulada a las vías

Con base en estas observaciones, se pudo determinar que el 90% de la deforestación se concentra en los primeros 3,6 km de un eje vial, mientras que la acumulación de la deforestación comienza a disminuir a los 5,1 km de la vía, generando una acumulación más lenta cuando se supera el 94 % de la deforestación. Se considera que todas las zonas con distancias menores a estos valores umbral indican áreas donde la proximidad a los accesos viales, tuvieron una fuerte influencia en la deforestación y en los cambios de uso del suelo, permitiendo mayor accesibilidad al territorio para consolidar los procesos de ocupación.

Para ejemplificar este resultado, se analiza la vía que comunica a los centros poblados de Miraflores y Calamar en el departamento del Guaviare (Figura 3-3). Esta vía tiene una longitud de 160 kilómetros y sus actividades principales están asociadas a la ganadería extensiva, siembra de cultivos de coca y acaparamiento de tierras mediante la praderización. A su alrededor se presentan una gran matriz boscosa la cual muestra según el IDEAM (2024), altas tasas de deforestación que lo convierte en un núcleo principal de deforestación para el país.

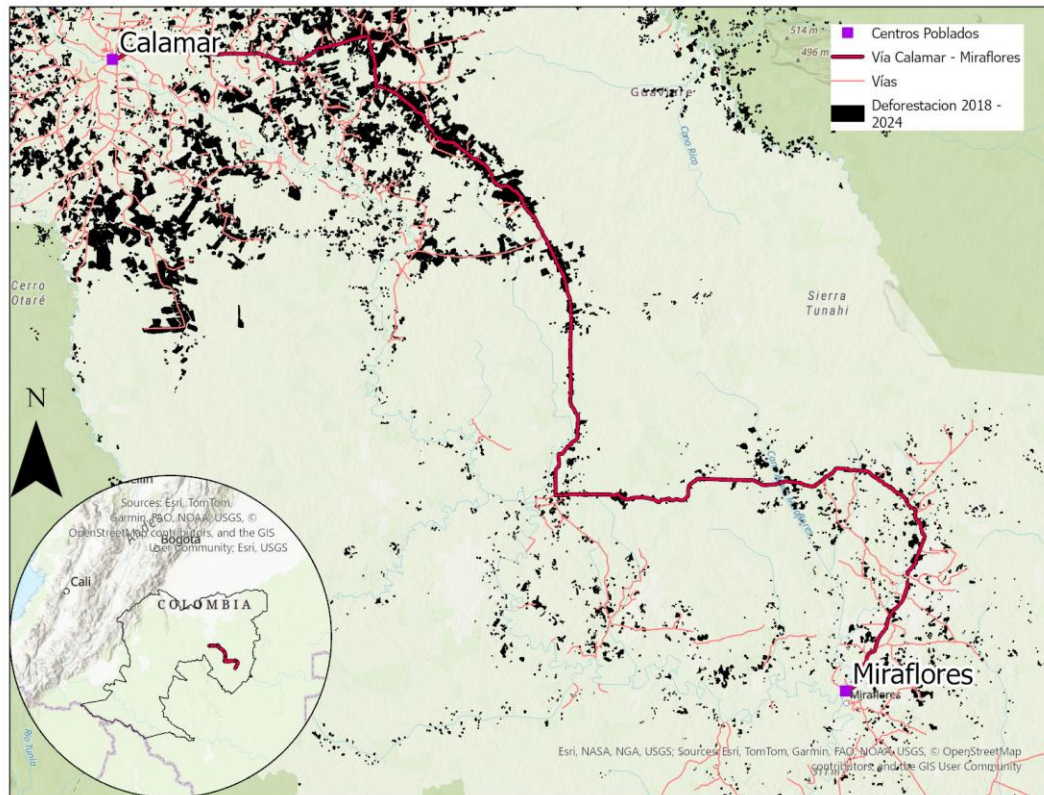


Figura 3-3. Deforestación en la vía Calamar – Miraflores

Al analizar la cercanía de los polígonos de deforestación se pudo encontrar que el 90% de esta se localiza en los primeros 1,7 kilómetros de distancia de la vía, un 52% más cerca que para el comportamiento de las vías de toda el área de estudio. La acumulación de la deforestación comienza a disminuir en 1,7 kilómetros, generando una acumulación más lenta para valores superiores a 87 % de la deforestación (Figura 3-4). Lo anterior muestra que los polígonos de deforestación se localizan muy cerca del margen de la vía lo que visibiliza una fuerte influencia de los accesos en la pérdida de bosque y posteriores cambios de cobertura y uso del suelo, ya que después de deforestarse pasa de un uso forestal a un uso diferente como el agropecuario (ganadería extensiva, cultivos lícitos e ilícitos, pastos).

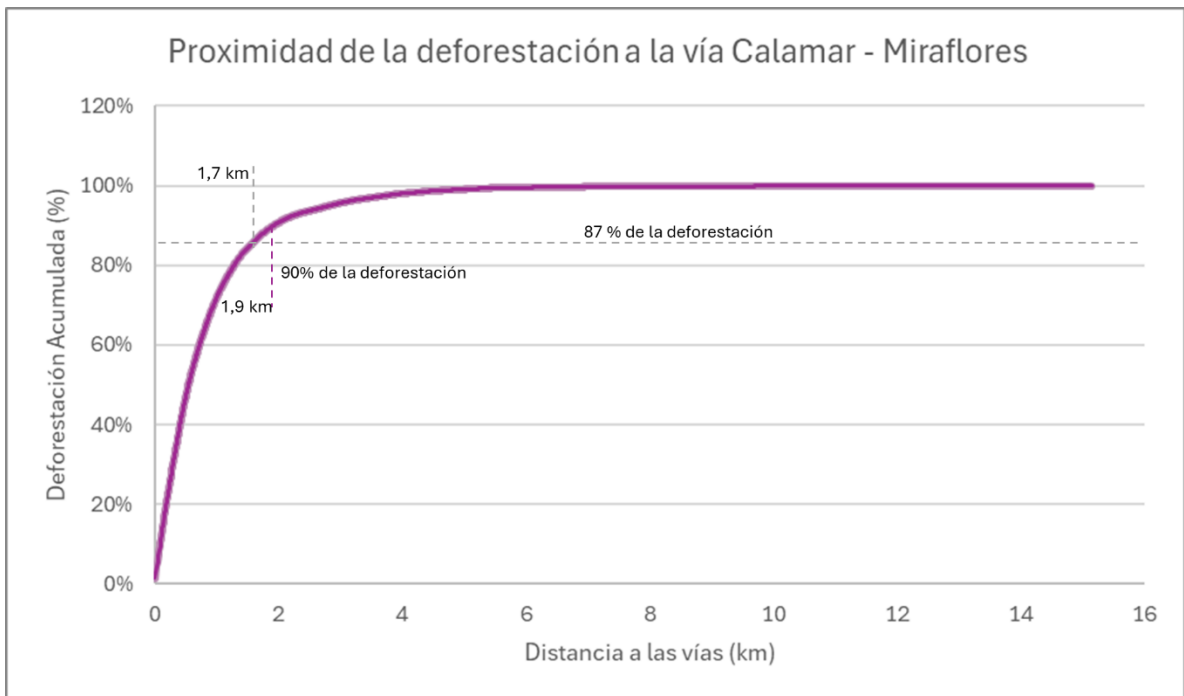


Figura 3-4. Proximidad de la deforestación acumulada a la vía Calamar - Miraflores

3.2 Análisis cuantitativo de datos

Los resultados obtenidos mediante el análisis cuantitativo de los datos es el siguiente:

- ✓ Análisis exploratorio de datos (EDA) básico

Se calcularon las siguientes estadísticas descriptivas:

Tabla 3-1. Estadísticas descriptivas para el área de análisis

Variable	Alias variable	Unidad de medida	Número de observaciones	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Vías	D_via	Longitud	128.432	0,150	0,338	0	2,702
Deforestación	A_defo	Área	128.432	1,109	3,946	0	89,923
Coca	D_Coca	Área	128.432	0,105	0,861	0	55,599
Centros Poblados	D_CP	Área	128.432	0,554	6,214	0	100,000
Ganadería	A_Gana	Área	128.432	8,949	21,290	0	100,000

Pozos hidrocarburos	D_PHidro	Área	128.432	0,003	0,044	0	1,000
Quemas	A_Que	Área	128.432	1,097	5,199	0	100,000
Ríos	D_Rio	Área	128.432	0,779	4,711	0	88,730
Tierras cultivadas	D_TCult	Área	128.432	2,314	9,191	0	100,000
Títulos mineros	D_Titu	Área	128.432	0,023	1,168	0	100,000
Pastos	D_Past	Área	128.432	15,601	26,689	0	100,000

* Las variables en el espacio muestral (cuadrícula) tienen alta presencia ceros por ausencia del fenómeno

Las variables A_defo, A_Gana, A_Que se definieron como variables *Dummy* o indicadoras, ya que representaron valores entre 1 y 0 para indicar la presencia o ausencia de cada variable.

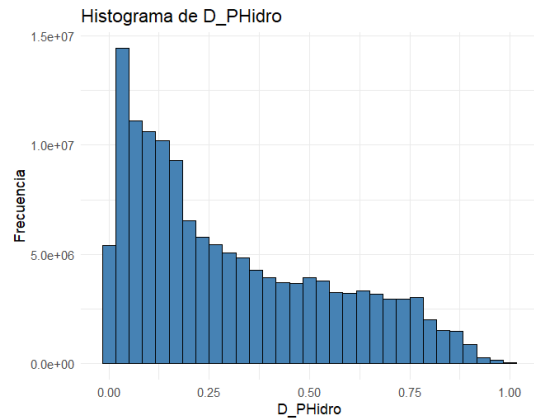
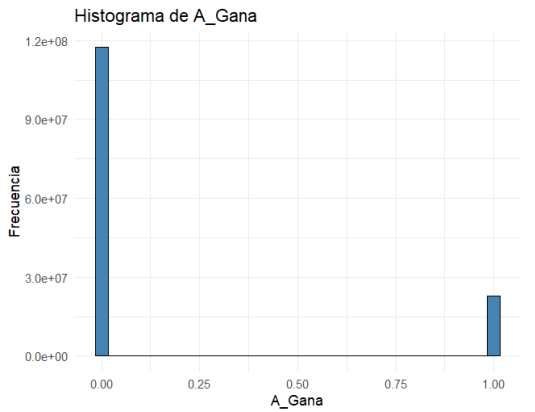
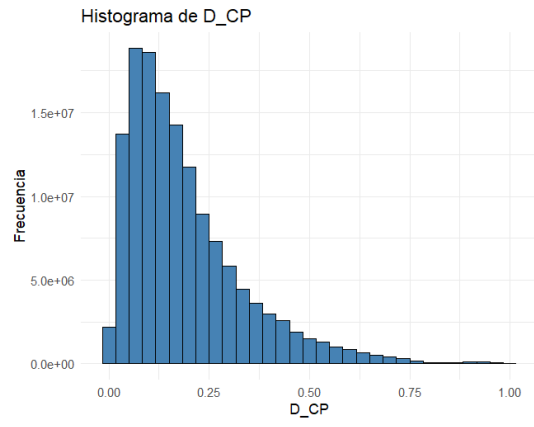
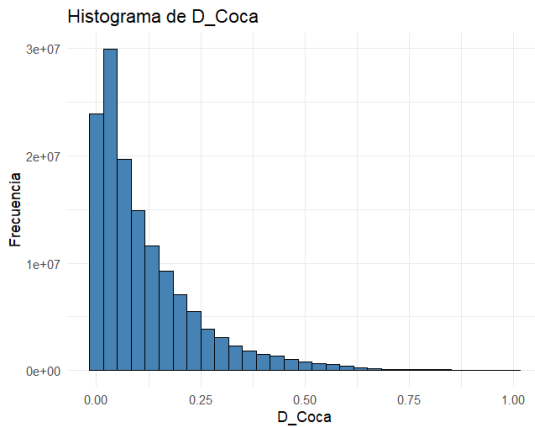
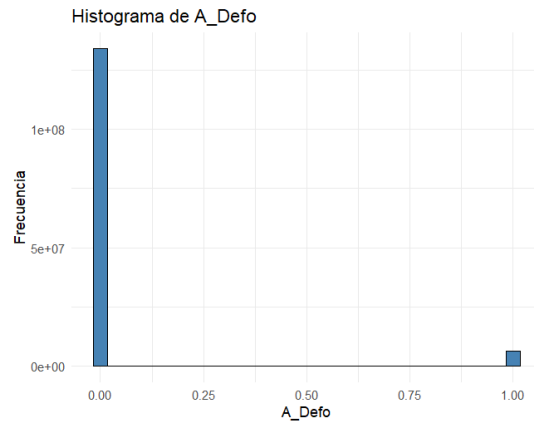
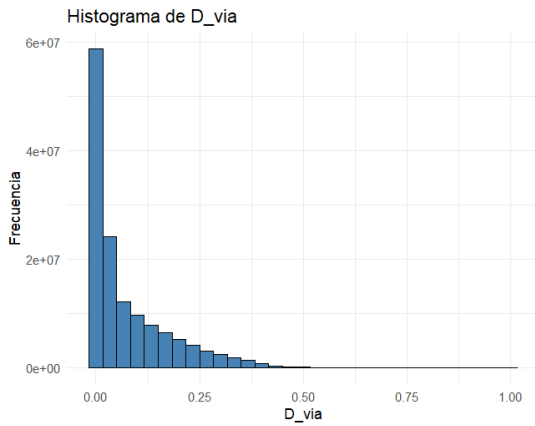
De la tabla 3-1, se pudo resaltar que la desviación estándar fue más grande y mayor a 1 en las variables de ganadería, pastos, deforestación, centros poblados, quemas, ríos tierras cultivadas y títulos mineros, lo que indicó que los valores fueron más dispersos y alejados de su media. Los demás valores estuvieron más agrupados y cercanos a su media con una desviación estándar por debajo de 1.

La mayoría de las variables presentaron una alta concentración de valores en cero, lo que mostró que existen valores ausentes en algunos lugares del espacio geográfico por el comportamiento de la variable; esto no indica que haya ausencia por falta de datos; por esta razón observó medias generalmente bajas. Existen valores máximos relativamente altos para todas las variables, excepto vías y pozos de hidrocarburos, lo que indicó la presencia de valores extremos o áreas donde estas características son significativamente mayores.

Ganadería y pastos mostró la media más alta, sugiriendo una presencia más generalizada de estas variables en comparación con las demás analizadas.

Para conocer la distribución de cada de una de las variables, se elaboraron histogramas de frecuencias para cada una de las variables (Figura 3-5), se observó que las variables no tenían una distribución normal, sino que estaban sesgadas positivamente en donde se concentraban la mayoría de los valores de cero. Se realizó una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov en donde se obtuvo que los datos no tienen distribución normal ya que los valores de p son menores al nivel de significancia, por lo que se rechaza la hipótesis

nula de que los datos provienen de una distribución normal. Este paso fue importante para determinar más adelante el tipo de modelo a emplear para el análisis de relación de las variables.



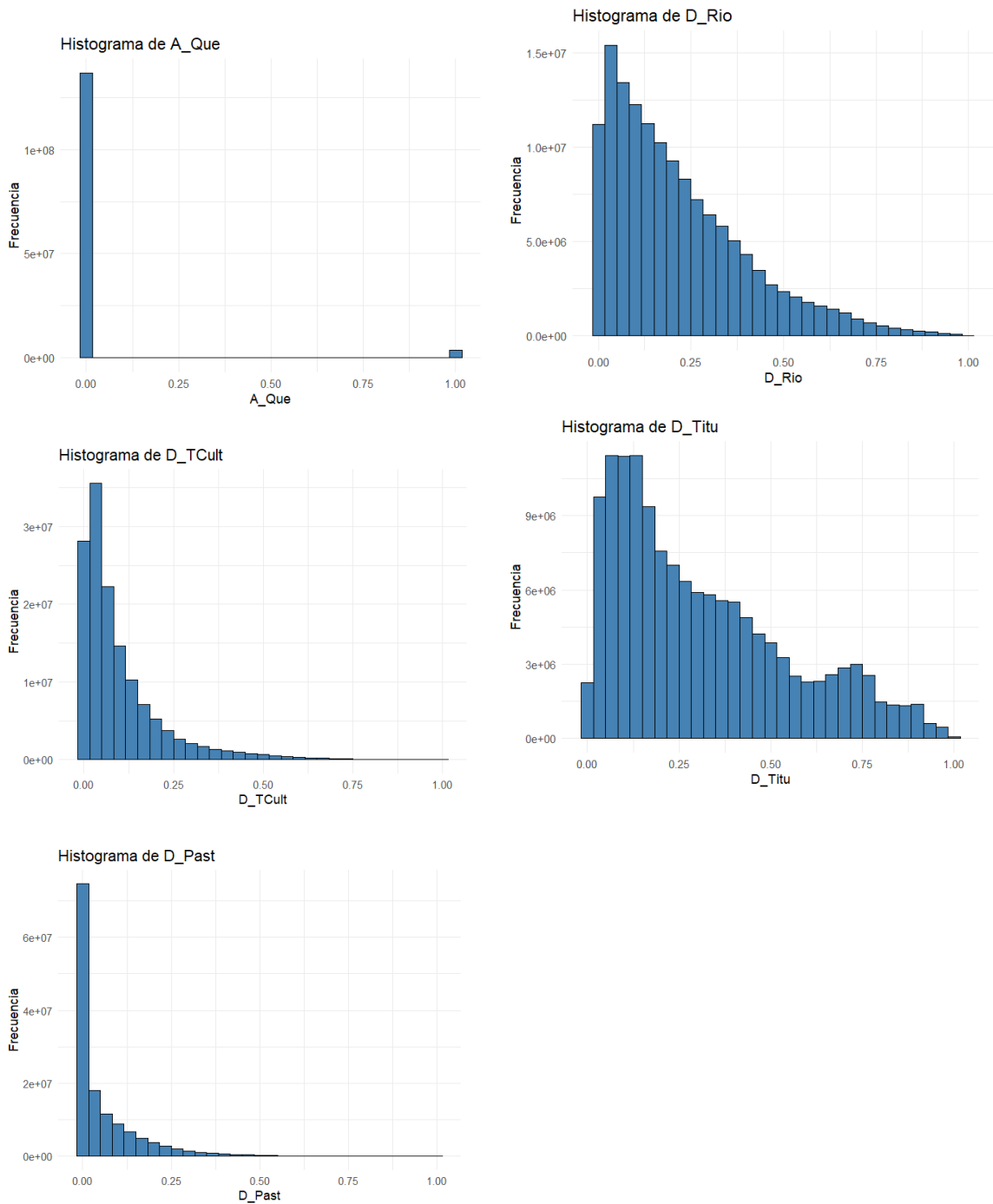


Figura 3-5. Histogramas de frecuencias para las variables originales

Debido a la no distribución normal de los datos, se procedió a realizar una normalización de mínimos y máximos que ayuda a reducir los valores negativos o ceros y mejorar la

distribución de los datos en una misma escala. El resultado obtenido no corrigió la distribución no normal de los datos, por lo que se estableció que los datos tenían una distribución binomial negativa con muchos ceros.

Posteriormente, para determinar la relación bivariada que puede existir entre las variables, se elaboró la matriz de correlación con el coeficiente de Spearman, lo cual mostró las correlaciones entre una variable dependiente y cada una de las variables independientes en un rango de 0 a 1, siendo los valores más cercanos a 0, la relación más baja entre las variables y los valores más cercanos a 1, el valor con mayor relación entre las variables. La Figura 3-6, muestra una fuerte relación entre Títulos mineros – D_Titu y Pozos de Hidrocarburo - D_PHidro (0,832), por otro lado, para la variable dependiente relacionada a vías – D_via -, las relaciones más fuertes se generaron con Pastos – D_Past (0,755), Pozos de Hidrocarburo - D_PHidro (0,568), Tierras Cultivadas - D_TCult (0.522) y Títulos mineros – D_Titu (0.522); por otro lado, la variable Rios – D_Rio tiene una relación negativa con la variable D_via.

Variable	A_defo	D_CP	D_Coca	D_Past	D_PHidro	D_Rio	D_TCult	D_Titu	D_via	A_Gana	A_Que
A_defo	1	0,016	0,090	0,197	0,041	-0,023	0,159	0,047	0,150	0,075	0,114
D_CP	0,016	1	0,455	0,464	0,027	0,378	0,472	0,129	0,373	0,242	-0,004
D_Coca	0,090	0,455	1	0,483	0,016	0,096	0,582	0,151	0,332	0,176	-0,004
D_Past	0,197	0,464	0,483	1	0,396	0,104	0,671	0,387	0,755	0,575	0,134
D_PHidro	0,041	0,027	0,016	0,396	1	-0,127	0,245	0,832	0,568	0,314	0,141
D_Rio	-0,023	0,378	0,096	0,104	-0,127	1	0,175	-0,191	-0,008	-0,014	-0,053
D_TCult	0,159	0,472	0,582	0,671	0,245	0,175	1	0,275	0,528	0,232	0,041
D_Titu	0,047	0,129	0,151	0,387	0,832	-0,191	0,275	1	0,522	0,354	0,090
D_via	0,150	0,373	0,332	0,755	0,568	-0,008	0,528	0,522	1	0,446	0,152
A_Gana	0,075	0,242	0,176	0,575	0,314	-0,014	0,232	0,354	0,446	1	0,092
A_Que	0,114	-0,004	-0,004	0,134	0,141	-0,053	0,041	0,090	0,152	0,092	1

Figura 3-6. Matriz de correlación de Spearman para las variables

Este análisis de relación bivarado es un indicativo de la fuerza y asociación monótona de cada una de las variables con la variable vías, se espera que el modelo relacional multivariado tenga un comportamiento complementario a este análisis.

Adicionalmente se calculó el índice de autocorrelación espacial de Moran (I Moran) para determinar la correlación de la variable D-via con la región del espacio. El resultado arrojó un índice de Moran moderado (0.4472) y un z-score (225.46) que para el análisis espacial que se busca en el estudio, indica que el fenómeno no está de manera aleatoria en el

espacio ni distribuida uniformemente dentro del territorio, eso justifica el uso de covariables que expliquen la relación de las vías en el cambio de uso del suelo.

3.3 Aplicación modelo de relación de variables

Para responder al Objetivo 3 - Implementar un modelo que permita analizar las relaciones entre accesos viales, ocupación del territorio y dinámicas de transformación en el contexto amazónico colombiano – se desarrolló un modelo de Regresión Logística como se detalla a continuación:

✓ Modelo de Regresión Logística

Para analizar las relaciones entre la variable dependiente vías y las variables independientes, se realizó un modelo de regresión logística (Logit) para predecir la ocurrencia de la variable dependiente binaria (D_vias) a partir de las variables independientes; a diferencia de otros modelos de regresión en los cuales la variable dependiente es continua, en los modelos de regresión logística es discreta y binaria, pues asume solo dos valores posibles, 1 o 0, en los que 1 es ocurrencia y 0 no ocurrencia (Camacho, 2022).

Para este caso, el modelo de regresión logística midió en escala logarítmica el cambio esperado en la razón de probabilidades (*odds ratio*) en $(P/1-P)$ para la ocurrencia de D_vias (1) vs. No ocurrencia de D_vias (0) en presencia de las variables independientes. Y por lo tanto B_0 determinó el (*log odds*) de probabilidad de presencia de D_vias en ausencia de las variables independientes, mientras que $B_1 \dots B_i$ indicaron el cambio esperando en el (*log odds*) para cada incremento en una unidad de las variables independientes. (Kleinbaum y Klein, 2010)

Acorde a los valores de Odds Ratio obtenidos y para determinar la magnitud o fuerza de asociación entre la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente y la exposición de los valores a la variable independiente respectiva se establecen los valores de referencia en la Tabla 3-2. (Camacho, 2022)

Tabla 3-2. Valores de referencia para la Magnitud de los Odds Ratio

Magnitud	Odds Ratio	
	Variables +	Variables -
Insignificante	0 - 1,68	6,60 - 1
Pequeña	1,68 - 3,47	0,29 - 0,60
Moderada	3,47 - 6,71	0,15 - 0,29
Grande	> 6,71	< 0,15

Datos: elaborado con base en Camacho 2022

Con el fin de disminuir la dependencia espacial entre las variables y reducir la probabilidad de cometer errores Tipo 1 (falso positivo: cuando se rechaza una hipótesis nula verdadera) al evaluar la significancia de las variables independientes se realizó un muestreo espacial aleatorio de 10.000 puntos de los eventos 1 y 0 para la variable D_vias, separados a 360 metros entre sí como lo indica Camacho (2022), se asumió que la autocorrelación disminuye cuando aumenta la distancia de los puntos, por lo que la distancia entre ellos establecida representa un punto de equilibrio entre la reducción de autocorrelación y el tamaño de la muestra para estimar los parámetros del modelo (Camacho (2022)).

Debido a la alta presencia de ceros en las variables, se optó por una muestra balanceada en la cual la proporción de casos de 1 y 0 es 53% y 46%, esto mejora la capacidad del modelo para poblaciones en las que la cantidad de casos 1 son inferiores a las de casos 0, reduciendo la posibilidad de rechazar variables significativas. Adicionalmente, las muestras balanceadas, requieren de un menor número de observaciones para que los resultados de las estimaciones sean fiables en los coeficientes B.

El resultado del modelo de regresión logística para el área de análisis (Figura 3-7), mostró que la mayoría de los coeficientes de las variables predictoras son altamente significativas (p -value < 0.001, indicado por ***), exceptuando D_Rio ($p = 0.612$) y D_TCult ($p = 0.993$) las cuales no son estadísticamente significativas; lo que sugiere que estas variables no tienen una relación lineal significativa con el log-odds de Accesos_viales en presencia de las otras variables en el modelo.

```

glm(formula = formula(paste(Accesos_viales, "~ .")), family = binomial(link = "logit"),
data = datos_modelo_muestra)

Coefficients:
              Estimate(B)      Std. Error      z value      Pr(>|z|)
(Intercept) -21.659954      0.736389     -29.414      < 2e-16 ***
A_defo       0.911610      0.201912      4.515      6.33e-06 ***
D_CP         4.138962      0.351972     11.759      < 2e-16 ***
D_Coca      -2.524721      0.393355     -6.418      1.38e-10 ***
D_Past      18.070732      0.998922     18.090      < 2e-16 ***
D_PHidro    4.769554      0.171183     27.862      < 2e-16 ***
D_Rio       -0.101857      0.200873     -0.507      0.612
D_TCult     -0.006087      0.717133     -0.008      0.993
A_Gana      2.485917      0.235453     10.558      < 2e-16 ***
A_Que       2.437033      0.436194      5.587      2.31e-08 ***
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 9338.4 on 6759 degrees of freedom
Residual deviance: 4935.9 on 6750 degrees of freedom

(4 observations deleted due to missingness)
AIC: 4955.9

Number of Fisher Scoring iterations: 6

```

Figura 3-7. Resultado del modelo de regresión logística

Los coeficientes estimados B indicaron un incremento o disminución en una unidad de cada variable independiente, determinado en la columna Odds Ratio de la Tabla 3-3. Según Hartmann, Koop y Lois (2023), el Odds Ratio o la razón de probabilidades, indica cómo cambia la probabilidad de ocurrencia de los Accesos Viales cuando la variable independiente aumenta en una unidad, sin embargo, para este tipo de modelos se usa la probabilidad logaritmizada (logit) en dónde, un Odd Radio mayor a 1 indica que un aumento de una unidad en la variable independiente está asociado con un aumento en las probabilidades de que la variable de dependiente (Accesos Viales) sea 1 (presencia de la variable); un Odd Radio menor a 1 indica que un aumento de una unidad en la variable independiente está asociado con una disminución en las probabilidades de que la variable de dependiente sea 1; y si Odd Radio es igual a o muy cercano a 1, indica que no hay una asociación significativa entre la variable independiente y las probabilidades de la variable de dependiente.

Tabla 3-3. Cálculo Odds Ratio de los coeficientes

Variable Independiente	Coficiente (β) (ln Odd)	Odds Ratio (OR) = e^β
(Intercepto)	-21,659954	$3,53 \times 10^{-10}$
A_defo	0,911610	2,488
D_CP	4,138962	62,72
D_Coca	-2,524721	0,08
D_Past	18,070732	6.487.486.369
D_PHidro	4,769554	117,89
D_Rio	-0,101857	0,903
D_TCult	-0,006087	0,994
A_Gana	2,485917	12,01
A_Que	2,437033	11,44

Teniendo como referencia la Tabla 3-2, se determinó la magnitud de los Odds Ratio de cada una de las variables Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Magnitud de los Odds Ratio de las variables independientes

Variable Independiente	Odds Ratio (OR) = e^β	Magnitud y dirección
A_defo	2,488	Pequeña (+)
D_CP	62,72	Grande (+)
D_Coca	0,08	Grande (-)
D_Past	6.487.486.369	Grande (+)
D_PHidro	117,89	Grande (+)
D_Rio	0,903	Insignificante (-)
D_TCult	0,994	Insignificante (-)
A_Gana	12,01	Grande (+)
A_Que	11,44	Grande (+)

Para el caso de las variables con B negativo, como D_Coca, se indicó que, por cada aumento de esta variable, hay una disminución en la probabilidad de tener presencia de Accesos viales, ya que en un Odds Ratio de 0,08 y una magnitud grande, se presentó una reducción del 92% en la probabilidad de la presencia de vías, este comportamiento se pudo observar en el área de estudio ya que la mayor presencia de cultivos de coca está

muy cercano a los ejes de los ríos como sucede en la Reserva Nacional Nukak al margen del río Inírida, el eje del Río Putumayo en Puerto Leguizamo y Puerto Asís y al margen de los ríos Guayabero y Caño Cabra en el PNN Sierra de la Macarena. En cuanto a la variable D_Río que tiene un Odds Ratio de 0,903 y una magnitud insignificante, se mostró una disminución del 9,7% en la probabilidad en la presencia de vías, y se puede explicar su disminución en la probabilidad, debido a que en zonas en donde no hay presencia de carreteras, se usan los ríos como el eje de acceso, esto ha sido usado históricamente por las comunidades indígenas de la Amazonia. Y la variable D_TCult con un Odds Ratio de 0,994 y una magnitud insignificante, tuvo una disminución del 0,6% en la presencia de vías significativa, puede tener un comportamiento de disminución en la probabilidad a razón de que está muy poco representada en el espacio geográfico y en varios casos esta más asociado a los ejes de los ríos como los cultivos de arroz al sur del Meta y San José del Guaviare, en donde se aprovecha la cercanía de los ríos para extraer la mayor cantidad de agua para inundar el cultivo.

Por otro lado, para el caso de las variables con B positivo en dónde se indicó que, por cada aumento de esta variable, hay un incremento en la probabilidad de tener presencia de Accesos viales. Para la variable D_Past se obtuvo un Odds Ratio muy alto con una magnitud grande, lo que sugiere una separación casi perfecta en los datos, es decir, la presencia de Accesos_viales es casi exclusiva o determinista de la variable pastos, lo que significó que el modelo predice casi perfectamente para esta variable. Este resultado se puede explicar ya que, en el área de estudio, al momento de construir una vía y deforestar al margen de esta, el primer uso que se le da al suelo a praderización, haciendo espacialmente más predominante la presencia de pastos en el área con 3.232.316 ha, que corresponde a un 23% del área de estudio. La variable D_PHidro obtuvo un Odds Ratio de 117,89 y una magnitud grande, lo que significó un aumento del 11.689% en la probabilidad de la existencia de accesos viales lo cual tiene importancia ya que cuando se establece un pozo de hidrocarburo, los accesos viales son vitales para el transporte del material extraído así como de la maquinaria e insumos que requiere la explotación petrolera, esto se puede ver en el norte del área, al sur del Meta ya que allí la extracción de hidrocarburos es más fuerte y alrededor de una plataforma petrolera hay alta presencia y consolidación de ejes viales que conectan con los centros poblados más lejanos.

Para la variable D_CP se calculó un Odds Ratio de 62,72 y una magnitud grande, lo cual significó un aumento de 6.172% en la probabilidad de existencia de vías, lo que podría indicar que los accesos viales son predominantemente vías terciarias o de penetración en el bosque que se conectan con los centros poblados consolidados con áreas más alejadas, lo que permite una disminución del desplazamiento de las comunidades locales entre centros poblados. Esta dinámica se puede observar con las cabeceras municipales de Calamar, El Retorno, San José del Guaviare, Miraflores, San Vicente del Caguán, Cartagena del Chairá, La Macarena, Puerto Concordia, Puerto Rico, Vistahermosa, Uribe, Mapiripán, Mesetas y San Juan de Arama como nodo que se conecta con los lugares más alejados, mientras que en la cabecera municipal de Puerto Leguizamo su desplazamiento por ríos como el Putumayo es mucho mayor.

La variable A_Gana obtuvo un Odds Ratio de 12,01 y una magnitud grande, que significó un aumento de 1.101% en la probabilidad de la presencia de vías, y esto tiene explicación ya que como complemento a la variable D_Past, la ganadería usa gran parte de los pastos para desarrollar la actividad, esto es consistente ya que en la Amazonia predomina la ganadería extensiva y su forma de desplazamiento esta monitoreada por el Instituto Colombiano Agropecuario - ICA mediante las Guía Sanitaria De Movilización Interna De Animales (GSMI), en donde se puede identificar que mediante esta autorización de sanidad el ganado es movilizado entre predios (origen y destino) por vías y en algunos casos pero en menor proporción por río ya que requiere información sobre el transportador, el vehículo y la ruta de transporte. Esta dinámica se puede observar principalmente en los municipios de Cartagena del Chairá, San Vicente del Caguán y La Macarena que según el ICA tienen los mayores censos bovinos de la Amazonia y a su vez la mayor cantidad de kilómetros nuevos de vías. (FCDS, 2022).

En cuanto a la variable A_Que se obtuvo un Odds Ratio de 11,44 y una magnitud grande, que indicó un aumento de 1.044% en la probabilidad de la presencia de vías. Las quemas se realizan en zonas previamente deforestadas y en zonas de pastos o sabanas naturales (herbazales) con el objetivo de nutrir el suelo a partir del material vegetal transformado, lo que permite dar paso al desarrollo de actividades como la ganadería, la siembra de pastizales, cultivos agrícolas, agroindustria, cultivos de uso ilícito; los cuales se presentan en gran proporción en zonas donde existen los trazados viales como se explicó en las anteriores variables.

Finalmente para la variable A_defo, se obtuvo un Odds Ratio de 2,488 y una magnitud pequeña, que indicó un incremento de 148,8% en la probabilidad de la existencia de vías, y esto se debe a que se tiene una relación directa con la apertura de una nueva vía en zonas boscosas ya que es necesario tumbiar el bosque para abrir un camino o trocha, esta variable presenta cambios en la matriz de bosque porque fragmenta el bosque e incide negativamente en los procesos de conectividad de ecosistémica e interrumpe los flujos ecológicos.

Se realizó el Ajuste del modelo (Bondad del Ajuste) para determinar la pertinencia de usar el resultado del modelo de regresión Logística para explicar la probabilidad de que existan accesos viales a partir de las variables independientes, para ello se calcularon las siguientes pruebas:

- ✓ Pseudo R-cuadrado de McFadden: El valor obtenido fue de 0,4714419 y es considerado un ajuste excelente para un modelo logístico, lo que indica que las variables predictoras explican una proporción sustancial de la variabilidad en la ocurrencia de accesos viales.
- ✓ Pseudo R-cuadrado de Cohen: El valor es 0,3944008 y se sitúa entre un efecto mediano y grande, lo que refuerza la capacidad explicativa de las variables.
- ✓ Prueba Chi-Cuadrado: El valor p fue 1 y aunque formalmente indica un buen ajuste, en conjuntos de datos grandes como los de este estudio, esta prueba puede ser muy sensible y un p-valor alto no siempre significa un ajuste perfecto en la realidad, sin embargo, se complementó con las demás pruebas estadísticas.
- ✓ Relación Devianza Residual / Grados de Libertad Residuales: La devianza residual es 4.935,9 y los grados de libertad residuales son 6.750, obteniendo $4.935,9 / 6750 = 0,731$; dado que este valor es menor que 1, se sugiere que no hay sobredispersión.

Adicionalmente se calculó el Área Bajo la Curva (AUC) en el que se obtuvo un valor del $AUC = 0.9172797$; lo que indica que es un valor excelente para decir que el modelo tiene una muy alta capacidad para predecir donde hay accesos viales (1) y donde no los hay (0). Un AUC superior a 0.9 se considera excelente.

Para el primer resultado del modelo con todas las variables, fue necesario identificar el nivel de multicolinealidad de las variables en el modelo de regresión, se calculó el Factor Inflacionario de la Varianza (FIV) en donde la variable D_Titu presentó un valor FIV de 6,588542 y la variable D_PHidro con un FIV de 6,661308, los cuales superaron el umbral de 5 y fue mayor al resto de las variables que oscilaron entre 1 y 2 (Tabla 3-5). A partir de lo anterior se excluyó del modelo la variable D_Titu que tiene menor representatividad en el área de análisis, esta exclusión generó que, al calcular nuevamente el FIV sin esta variable, los valores de las demás variables estuvieron entre 1 y 2, incluida la variable D_PHidro.

Tabla 3-5. Cálculo Factor Inflacionario de la Varianza (FIV)

Variable	FIV
A_defo	1,020421
D_CP	1,649677
D_Coca	1,499069
D_Past	2,059531
D_PHidro	6,661308
D_Rio	1,363666
D_TCult	2,243518
D_Titu	6,588542
A_Gana	1,01938
A_Que	1,029243

El resultado del modelo de Regresión Logística fue el que más se ajustó a la naturaleza de los datos y el objetivo de explicar la relación entre los accesos viales, ocupación del territorio y dinámicas de transformación en el contexto amazónico colombiano, expresado en el análisis de variables explicativas.

✓ Comparación de modelos de relación de variables

Para establecer el modelo que más ajustaba a la relación buscada y la naturaleza de los datos, se analizaron varios modelos multivariados que cumplieran el criterio de no normalidad de los datos para las variables identificadas, arrojando los siguientes resultados:

- Regresión de Poisson: Mostró que variables como la D_vías, coca, ganadería, quemadas, ríos y tierras cultivadas se asocian positivamente con la variable dependiente. El Pseudo R-squared fue bajo (0,1336), indicando una capacidad limitada del modelo para explicar la varianza.
- Regresión Binomial Negativa: Se exploró debido a la posible sobredispersión, pero la dispersión resultante fue menor que 1 (subdispersión). El Pseudo R-squared fue más bajo (0,1006).
- Regresión Zero-Inflated Poisson (ZIP): Se intentó modelar un posible exceso de ceros en la variable dependiente, pero el parámetro de inflación de ceros no fue significativo, sugiriendo que el modelo de Poisson simple era suficiente. El Pseudo R-squared fue bajo (0,07703).

3.4 Análisis de patrones y procesos de ocupación por accesos viales

Como parte del cumplimiento del objetivo 1 - Identificar la relación entre los accesos viales y el cambio de uso y cobertura del suelo, considerando los patrones y procesos de ocupación del territorio -, se abordó un análisis multitemporal de las dinámicas de ocupación en el área de estudio a partir de un análisis de métricas del paisaje que explican los patrones y tendencias entre los años 2020 y 2024, teniendo como insumo las coberturas de la tierra del SINCHI (SINCHI, 2020; 2024) clasificadas en transformadas y seminaturales y el software TerraView con el plugin GeoDMA que permite detectar patrones espaciales (Körting et al., 2008).

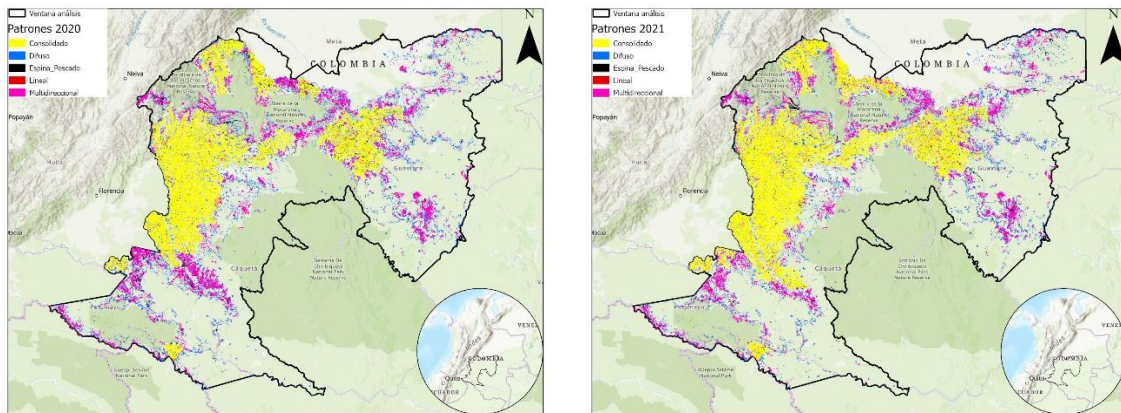
Acorde a la metodología para identificación de patrones (Körting et al., 2008), en total, se seleccionaron 466 muestras de entrenamiento, de las cuales 193 corresponden a patrones difuso, 57 a lineal, 48 a espina de pescado, 128 a multidireccional y 40 a consolidado; el clasificador reservó el 40% de las muestras para validación.

La Tabla 3-6, describe la relación del cálculo obtenido para las métricas del paisaje en cada una de las tipologías identificadas. Esta relación se obtuvo después de generar la clasificación usando las muestras de entrenamiento y el algoritmo clasificador.

Tabla 3-6. Relación de las métricas del paisaje y patrones espaciales

Patrón	Perímetro	Área	Relación perímetro área	Índice de forma	Índice de Dimensión Fractal	Círculo circunscrito	Radio de Giro
Consolidado	X	X	X	X			X
Difuso		X		X	X	X	
Espina de Pescado	X					X	
Lineal	X	X	X		X	X	X
Multidireccional				X			

Los resultados obtenidos para cada año se observan en la Figura 3-8, en color amarillo el patrón consolidado, en azul el patrón difuso, en negro el patrón espina de pescado, en rojo el patrón lineal y en magenta el patrón multidireccional; estos resultados se ajustaron acorde a los rangos obtenidos de las métricas del paisaje para obtener una información más precisa de los patrones obtenidos.



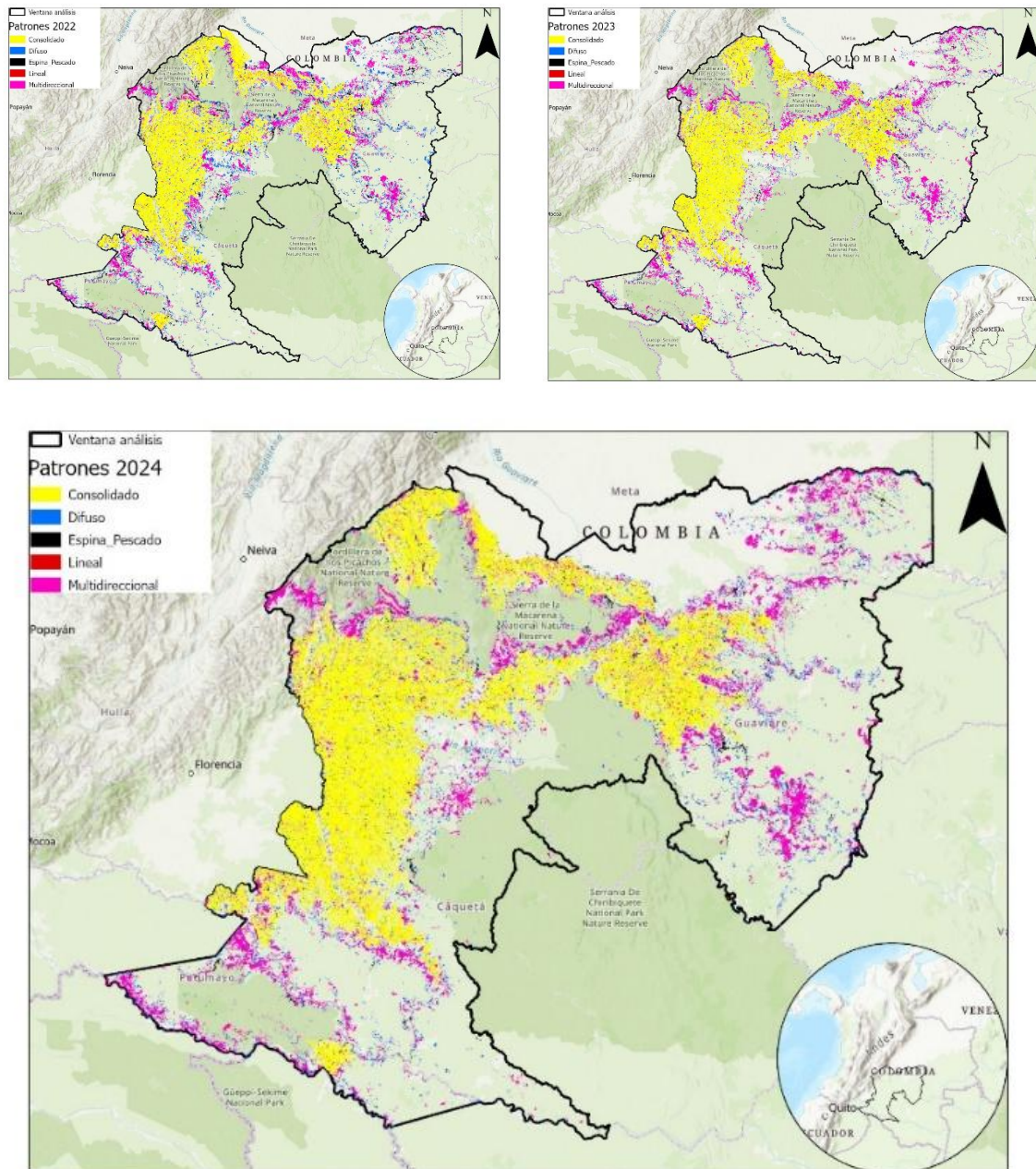


Figura 3-8. Patrones espaciales para los años 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024

La validación a partir de matrices de confusión arrojó un coeficiente kappa de (0,53) para el año 2020, (0,65) para el año 2021, (0,50) para el año 2022, (0,62) para el año 2023 y (0,80) para el año 2024, lo que significa que los resultados obtenidos son confiables y consistentes.

Los resultados del comportamiento de los patrones revelaron que en el área de estudio predomina el patrón consolidado (color amarillo Figura 3-8) en todos los periodos, pasando de 1.687.867 ha en 2020 a 2.306.377 ha en 2024, relacionado a las zonas de transformación más antiguas o con procesos de ocupación más avanzados en los municipios de San Vicente del Caguán, La Macarena, San José del Guaviare, Calamar y los municipios del sur del Meta como Vistahermosa y Uribe, se le asocia una heterogeneidad de actividades como ganadería extensiva, crecimiento de centros poblado y conexión vial entre poblaciones, pastizales, actividades agrícolas, entre otros; le siguió el patrón multidireccional el cual surgió de la unión y crecimiento de los polígonos de manera desordenada de los patrones difusos, lineales o espina de pescado, pasó de 783.223 ha en 2020 a 890.703 ha en 2024. Este patrón se presentó contiguo a la matriz consolidada, al interior de las áreas protegidas del Sistema de Parques Nacionales como el PNN Tinigua, PNN Sierra de la Macarena, PNN La Paya y PNN Serranía de Chiribiquete, en el municipio de Mapiripán entre los ríos Siare e Iteviare y en la zona de Reserva Forestal del Ley Segunda de la Amazonia en los municipios de Miraflores, Cartagena del Chairá (Sector del Río Caguán), predominando las áreas destinadas para ganadería extensiva y rastrojos de vegetación secundaria en donde se realizó actividades agrícolas o siembra de cultivos de coca, como sucedió en el municipio de Miraflores en los años 2000 (UNODC, 2004).

Le siguió el patrón difuso (color azul Figura 3-8) el cual corresponde a la etapa inicial de la ocupación a través de presencia de polígonos de tamaño pequeño y dispersos entre ellos, pasó de 798.112 ha en 2020 a 469.820 ha en 2024, se pudieron localizar en el borde de la matriz boscosa y áreas cercanas a los ríos como en el interfluvio de los ríos Siare e Iteviare en Mapiripán, Resguardo Indígena Nukak Makú y RNN Nukak, sector del Yarí en los límites con el PNN Serranía de Chiribiquete, municipio de Miraflores, en los PNN Tinigua, PNN Sierra de la Macarena y PNN la Paya. Este patrón se puede asociar a dinámicas de siembra de los cultivos de uso ilícito, como la coca, también a bosque fragmentado y vegetación secundaria generado por la dinámica de apertura de pequeños parches de deforestación impulsado por procesos de ocupación y vías no planificadas bajo el dosel del bosque que fueron construidas hace más de 20 años y son muy frecuentes en la Amazonia colombiana porque son usadas por diferentes grupos armados ilegales que se encuentran en el territorio (González y Gómez, 2020); (Botero, 2023).

Para relacionar los patrones y procesos de ocupación por accesos viales, se analizó los patrones lineales (color rojo Figura 3-8) y espina de pescado (color negro Figura 3-8), que según la tipología expuesta por Gavlak et al. (2011) y Figueiredo et al. (2024), están vinculados a la presencia de ejes carreteables o accesos viales, también mencionado por Berenguer et al. (2024) al describir que el efecto espina de pescado es un patrón clásico generado por los accesos viales. Los resultados en tendencia general mostraron que después de presentarse un patrón difuso en un sector, surge el patrón lineal junto con la aparición de un eje vial y posteriormente este se convierte en patrón espina de pescado ya que alrededor de la vía se facilita el proceso de ocupación y deforestación, y con el tiempo termina en una matriz más consolidada de transformación. Figura 3-9. En color amarillo el patrón consolidado, en azul el patrón difuso, en negro el patrón espina de pescado, en rojo el patrón lineal y en magenta el patrón multidireccional.

El patrón difuso ha mostrado un comportamiento de ocupación histórico y permanente en la Amazonia colombiana, ya que la mayor parte de la ocupación amazónica se ha presentado de manera nucleada y dispersa, conformando lo que se denomina “el anillo de poblamiento amazónico”, sobre la mayor cantidad de tierra rural que ha sido intervenida para actividades agrícolas, pastos y cultivos de coca por parte de las colonizaciones espontáneas y dirigidas históricamente (Arcila, 2010). Se concentra en los departamentos de Caquetá, Guaviare, Putumayo y el sur del Meta que tienen más del 98% de la tierra rural de la Amazonia colombiana (Arcila, 2010).

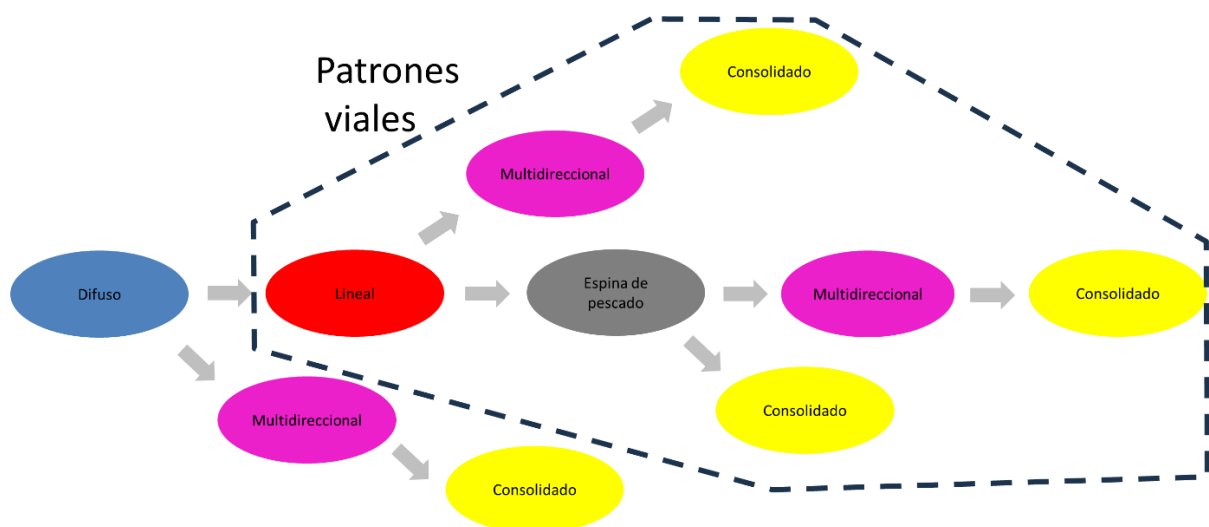


Figura 3-9. Trayectoria espaciotemporal de los patrones espaciales según tipología

Con los datos de análisis y el uso de un diagrama de flujo entre los años 2020 y 2024, se pudo observar que el patrón difuso en mayor proporción se mantiene como difuso y cambia a consolidado y multidireccional, mientras que en menor proporción pasa a lineal y espina de pescado. En cambio, los patrones relacionados a espina de pescado y lineal, mostraron procesos fuertes de ocupación y pasaron a consolidado y multidireccional, en pocos casos se mantuvieron en el mismo patrón, eso puede ayudar a afirmar que los patrones asociados a ocupación por accesos viales, tienden a cambiar hacia los procesos de transformación del paisaje más consolidados. Figura 3-10.

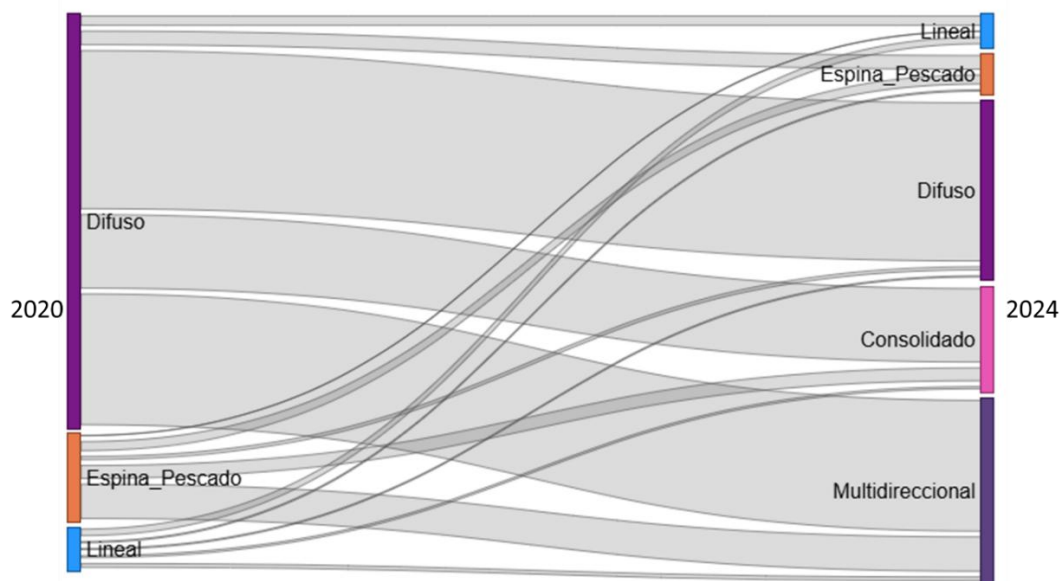


Figura 3-10. Diagrama de flujo de cambio entre 2020 y 2024

En términos de localización, un caso de patrones lineal y espina de pescado asociados a accesos viales, se identificó en el municipio de Mapiripán, entre los ríos Siare e Iteviare. Allí se observó (Figura 3-11) el cambio de un patrón difuso (azul), a patrones lineales (rojo) y espina de pescado (negro) asociados al crecimiento de la red vial en esta región. Adicionalmente se observó la ampliación del patrón multidireccional (magenta) hacia la matriz boscosa. Esta zona presentó desde el año 2018 altas tasas de pérdida de bosque, que lo catalogan como un foco activo de deforestación (IDEAM 2024) y alta frecuencia de incendios forestales para el establecimiento de pastos para ganadería y cultivos

agroindustriales como la palma de aceite que impulsan el desarrollo económico de la región. Los accesos viales se convierten en un catalizador clave para el desarrollo de las actividades económicas de la región ya que permiten transportar insumos, comunicar los cultivos de palma con las plantas extractoras, comercializar ganado entre predios y conectarse con centros poblados principales. FCDS en el año 2022 ha reportado un crecimiento vial en este municipio de 663 kilómetros nuevos de vías entre 2018 y 2022.

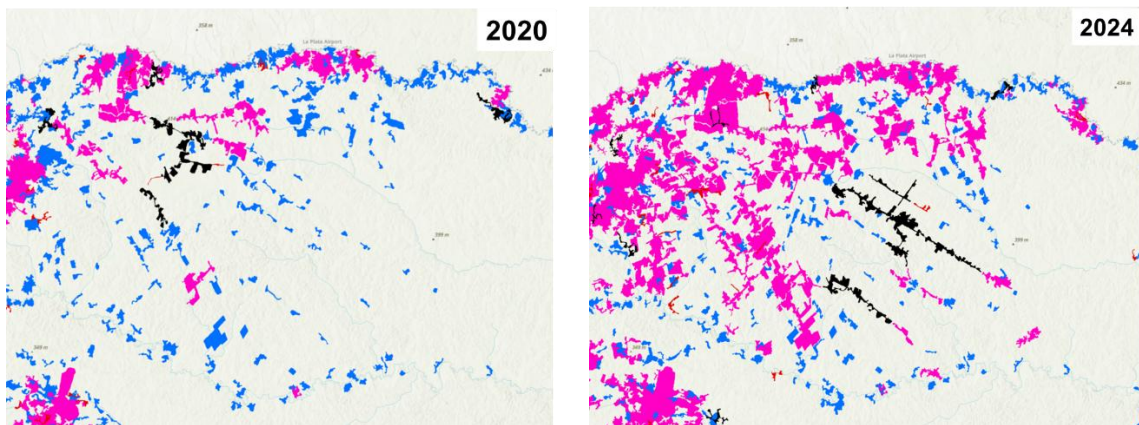


Figura 3-11. Patrones espaciales en Mapiripán entre 2020 y 2024 (azul=difuso, rojo=lineal, magenta=multidireccional, negro=espina de pescado)

Otra zona de confluencia entre vías y patrones lineales y espina de pescado se localiza al norte del PNN Serranía de Chiribiquete, en la vía que comunica a la “Marginal de la Selva”, desde el centro poblado de Puerto Cachicamo en Guaviare hasta el Río La Tunia en Calamar, muestra parches de transformación a pesar de que esta vía (ya existente) se encuentra bajo el dosel del bosque. En los últimos años, en esta zona ha avanzado la consolidación de la ocupación hacia la expansión ganadera y apropiación de tierras dada por la especulación que generó en el 2018 la “Marginal la Selva” en el territorio, que aumentó la deforestación entre los PNN Serranía de Chiribiquete y el PNN Sierra de la Macarena. Se observó (Figura 3-12), inicialmente una agrupación del patrón difuso (azul) al sur de la vía, en el Resguardo Indígena Llanos del Yará Yaguara II, pasó al patrón de espina de pescado (negro), asociados al crecimiento de la red vial y la unión de varios polígonos pequeños, para terminar en la unión con el polígono de consolidación (amarillo) y apareciendo nuevos patrones multidireccionales. El IDEAM en el año 2018, en el “*Boletín 17 de Alertas Tempranas de Deforestación*”, reportó esta zona como uno de los principales focos de pérdida de bosque del país (Núcleo 4), asociados al establecimiento de pasturas

y usurpación de tierras para actividades ganaderas, adicionalmente indicaron la presencia de actores armados en la zona que promueven el desarrollo de actividades de uso ilícito y la expansión de infraestructura vial no planificada e informal, que facilita el acceso al bosque (IDEAM, 2018).

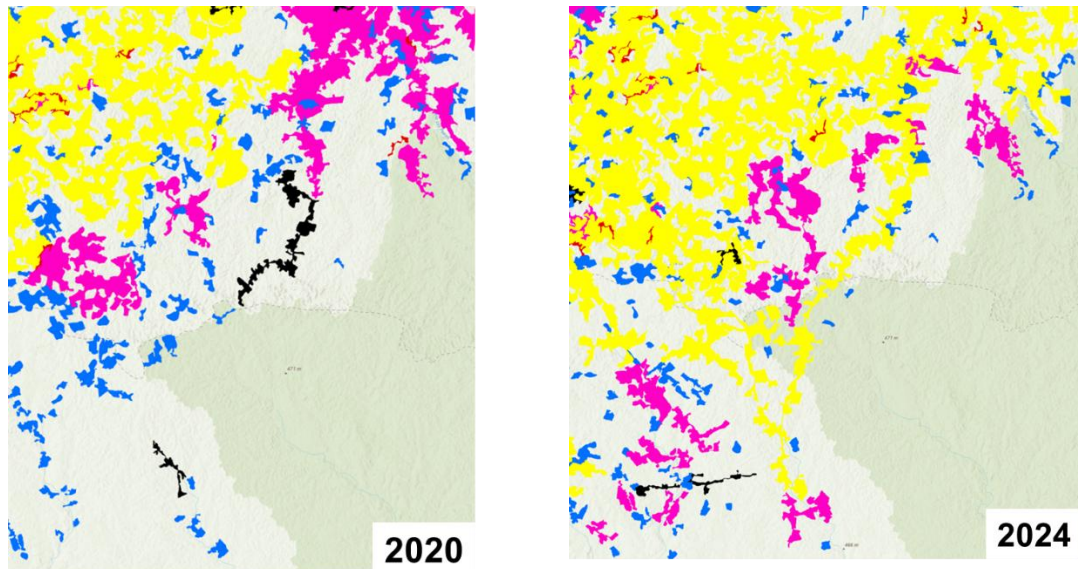


Figura 3-12. Patrones espaciales en borde PNN Serranía de Chiribiquete entre 2020 y 2024 (azul=difuso, rojo=lineal, magenta=multidireccional, negro=espina de pescado, amarillo=consolidado)

Para el área de estudio, se pudo establecer que los accesos viales parten de un patrón difuso, por lo que es importante anticipar medidas de control y manejo, ya que después de este proceso se intensifica la forma de ocupación; pasando a un patrón lineal que permite el establecimiento de la vía y deteriora la calidad de los ecosistemas ya que interrumpe los flujos de conectividad ecológica; posteriormente pasa a un patrón espina de pescado que agrava el cambio de uso del suelo como la pérdida y sustitución del bosque pero que posibilita aún procesos de restauración ecológica para recuperar parte de la función de los ecosistemas; y finalmente pasa a un patrón de consolidación que tiene menor presencia de ecosistemas naturales y hace más difícil los procesos de recuperación y restauración ecológica. En el arco de deforestación amazónico, la zona de mayor presión por los patrones asociado a accesos viales es el borde de la matriz boscosa, presente en los municipios de Mapiripán, borde del PNN Serranía de Chiribiquete, PNN Tinigua, PNN

Sierra de la Macarena, Reserva Forestal de Ley Segunda de la Amazonia en Caquetá y Guaviare y Resguardos Indígenas; todas ellos áreas de alta importancia ambiental y cultural para la conservación de los ecosistemas naturales del país.

En general, los análisis de patrones espaciales permiten entender la evolución temporal de cambios y la forma en que se transforma el paisaje a través de la ocupación, por lo que es crucial considerar y evaluar las medidas para controlar y gestionar sosteniblemente el cambio de uso del suelo, acorde a los tipos de actores presentes en el territorio, considerando las etapas de ocupación y el estado de la gobernanza y gobernabilidad del territorio.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Para explicar la probabilidad de que puedan ocurrir vías a partir de la relación con variables presentes en el territorio, propuesto en el Objetivo 3 del presente trabajo, el modelo de Regresión Logístico (Logit) es un muy buen modelo para explicar la ocurrencia de la variable dependiente binaria (D_vias) a partir de las variables independientes, ya que permite analizar las relaciones entre los accesos viales (variable dependiente) con la ocupación del territorio y dinámicas de transformación (variables independientes) en el contexto amazónico colombiano, teniendo en cuenta que los datos presentaron una distribución no normal y alta presencia de ceros por ausencia del fenómeno. Obtenido el resultado del modelo se puede concluir que las variables de deforestación, centros poblados, pastos, ganadería, pozos de hidrocarburo y quemas influyen en forma positiva en la probabilidad de la ocurrencia de los accesos viales; sin embargo, la variable de Pastos tiene una relación casi perfecta o determinista para explicar la presencia de las vías ya que obtuvo un Odds Ratio muy grande. Por otro lado, las variables de cultivos de coca, ríos y tierras cultivadas disminuyen la probabilidad de ocurrencia de los accesos viales. El modelo obtenido tuvo una relación con el Objetivo 1 ya que permitió identificar las causas que tienen relación con los accesos viales, las cuales generan el cambio de uso y coberturas del suelo, sin embargo, el análisis se complementó con la identificación de los patrones y procesos de ocupación por accesos viales del capítulo 3.3.4.

Lo anterior muestra que los accesos viales nos son aislados en la región y hacen parte de un proceso de ocupación no planificado, sin licenciamiento vial, ya que en muchos casos

están impulsados por las actividades de los grupos armados ilegales que se presentan en la región. Esto lleva a preguntar, ¿Cómo orientar la planificación vial regional de un territorio que tiene su vocación hacia la conservación de los ecosistemas? ¿Cómo reconvertir las actividades no sostenibles en la región a actividades que favorezcan la conservación de los bosques de manera incluyente y participativa con la población?

Por otro lado, el análisis de patrones asociados a accesos viales, desarrollado para los años 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024, como parte del resultado del Objetivo 1, arrojó y confirmó la forma de ocupación histórica en la Amazonia colombiana, donde se indica que las etapas iniciales el patrón difuso es el más predominante que muestra de manera muy incipiente la ocupación en el territorio por parte de diversos actores; en la evolución del cambio de patrones, le sigue el patrón lineal que agrupa varios polígonos pequeños y difusos, asociado a la construcción de las vías (excepto cuando la vía se encuentra bajo el dosel del bosque que indica su existencia previa), continúa el patrón de espina de pescado que intensifica el cambio de uso del suelo, paralelo al eje vial que conlleva a un procesos de consolidación mucho más fuerte de ocupación, como la ganadería extensiva, aperturas de pastizales, extensión de centros poblados. Gran parte de estos patrones se localizan en el borde de la matriz de boscosa en el arco de deforestación amazónico, en áreas de alta importancia ambiental y cultural lo que hace necesario que se tomen medidas de gestión y manejo sostenible hacia cambio de uso de suelo, teniendo en cuenta los diferentes actores que allí se encuentran ya que deben articularse con procesos de gobernanza y gobernabilidad del territorio. Esto lleva a cuestionar cómo el Estado y sus entidades pueden actuar de manera anticipada para evitar que avance la transformación de los bosques, ¿Tiene el país herramientas de predicción de transformación del paisaje para actuar anticipadamente y prevenir el daño sobre los ecosistemas naturales?

Con el análisis de influencia de las vías, como resultado para el Objetivo 2, se pudo evidenciar que el 90% de los polígonos de deforestación se localizan muy cerca del margen de la vía, a 3,6 km, lo que visibiliza una fuerte influencia de los accesos en la pérdida de bosque y posteriores cambios de cobertura uso del suelo, ya que después de deforestarse pasa de un uso forestal a un uso diferente como el agropecuario (ganadería extensiva, cultivos lícitos e ilícitos, pastos). Sin embargo, a escala más detallada, como en el caso

de la vía que comunica el centro poblado de Calamar con Miraflores, la deforestación es mucho más intensa y se localiza el 90% de ella en los primeros 1,7 km, por lo que es importante analizar de forma multiescalar y diferencial el comportamiento de la deforestación.

Estudio permitió identificar las causas que impulsan la creación de nuevas vías en la Amazonia colombiana, las cuales impactan en la pérdida de bosques y la degradación de los suelos, y sirve de referencia al Estado colombiano para crear estrategias integrales y diferenciadas para minimizar estos impactos que pueden llevar a que un aumento entre 2°C y 3°C los riesgos de extinción de especies y pérdida de biodiversidad en los ecosistemas sea irreversible, con alto impacto en las regiones tropicales (IPCC 2023).

4.2 Recomendaciones

La Amazonia colombiana enfrenta retos significativos generados por el cambio de uso del suelo que conllevan a procesos de deforestación y degradación del suelo, impulsados en gran medida por la expansión de la infraestructura vial, ganadería extensiva, actividades agrícolas, procesos de ocupación de manera insostenible con los ecosistemas naturales. Los hallazgos de este estudio señalan la importancia de implementar estrategias integrales para mitigar los impactos generados por el cambio de uso del suelo y cumplir con los compromisos internacionales de detener y revertir la pérdida de bosques para 2030.

El ordenamiento ambiental del territorio es fundamental en la Amazonia colombiana, este debe tener un enfoque participativo y de gobernanza que involucre a las comunidades locales, indígenas y autoridades en la toma de decisiones de la Amazonia. Es importante determinar los usos del suelo de manera clara y diferenciada con el objetivo de reconocer la importancia de los ecosistemas naturales y promover actividades productivas sostenibles, controlando y limitando la construcción de nuevas vías en áreas de alta importancia ambiental y cultural, que permita la creación y mantenimiento de corredores de conectividad ecológica y la restauración de las áreas degradadas. Además, es

necesario fortalecer la planificación local y regional, capacitando y apoyando a las autoridades y comunidades en la formulación de sus propios planes de ordenamiento.

La estrecha relación de causalidad entre la construcción de vías y la deforestación requiere de acciones contundentes para su control y reducción. Los resultados del estudio muestran que el 90% de los polígonos de deforestación se localizan muy cerca de las vías, a 3,5 kilómetros, lo que indica la necesidad de un enfoque multidisciplinario. Se debe implementar un monitoreo y seguimiento de la deforestación en tiempo real, utilizando tecnologías como imágenes satelitales, para una detección temprana de actividades ilegales y poder generar alertas oportunas. Es clave tener un control efectivo en el territorio, fortaleciendo la capacidad de las instituciones para combatir la pérdida de bosque, la siembra de cultivos de uso ilícito, la creación de vías ilegales y la ganadería extensiva en áreas de alta importancia ambiental y cultural.

Para minimizar la fuerte influencia de los accesos viales en el cambio de uso del suelo y la deforestación, es crucial implementar estrategias de gestión y manejo sostenible del territorio, incluyendo la formalización de la tenencia de la tierra para garantizar la seguridad jurídica de las comunidades y reducir los conflictos que se derivan de la disputa territorial; sin embargo se debe tener presente una buena planificación vial minimizando el daño ambiental, ya que se mostró que en las zonas en donde se presenta ocupación, la conexión vial se intensifica, por lo que es necesario fortalecer acciones hacia la restauración ecológica de áreas degradadas, especialmente cercanas a las vías, mediante la reforestación y la recuperación de suelos. Fomentar la infraestructura verde vial y conectividad ecológica es clave para mantener la integridad de los bosques y la biodiversidad.

La complejidad de mantener conservada la Amazonia colombiana y no llegar al Punto de Inflexión o Punto de no Retorno, en el cual los ecosistemas no podrán recuperarse, exige la creación de políticas públicas robustas, coherentes e integrales que aborden de manera holística la problemática. Es fundamental desarrollar e implementar una política de infraestructura vial sostenible que priorice la construcción y el mantenimiento de vías bajo criterios ambientales y sociales rigurosos, evitando áreas sensibles de alta importancia

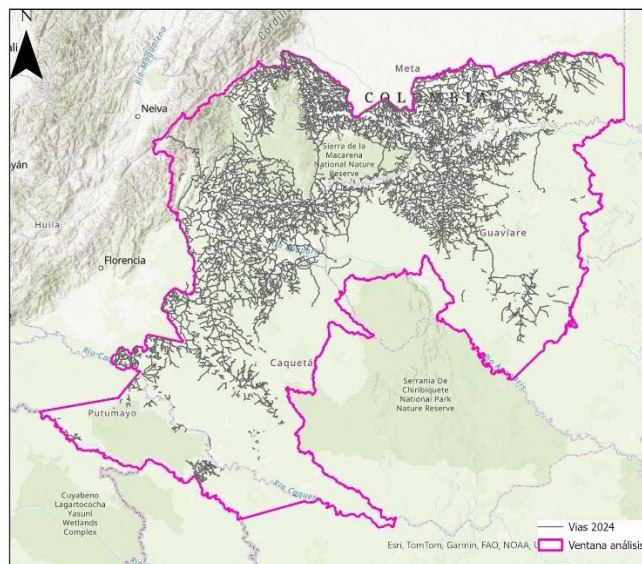
ambiental y cultural; así mismo impulsar e implementar incentivos para la conservación y el desarrollo sostenible, para que las comunidades puedan cambiar el modelo económico relacionado a la extracción de los recursos naturales. Si bien este estudio no abordó temáticas relacionadas al cambio climático, es importante elaborar estudios que relacionen el impacto de los accesos viales con este fenómeno ya que se pudo observar la estrecha relación de los accesos viales con los pastos, ganadería y deforestación que aportan grandes emisiones de Gases Efecto Invernadero a la atmósfera.

Finalmente, la implementación efectiva de cualquier estrategia para la Amazonia colombiana depende del fortalecimiento de la gobernanza y la gobernabilidad en el territorio, esto implica una presencia efectiva del Estado que garantice el cumplimiento de la ley y la protección de los derechos territoriales, con la participación de las comunidades y organizaciones locales reconociendo sus derechos territoriales.

A. Anexo: Recopilación de datos y variables

Del listado de variables con mayor significancia, se hace una búsqueda de información espacial en fuentes oficiales, bajo los siguientes criterios: espacializable, temporalidad 2022 – 2024, escala mínima 1:100.000 y cubrimiento de la ventana de análisis.

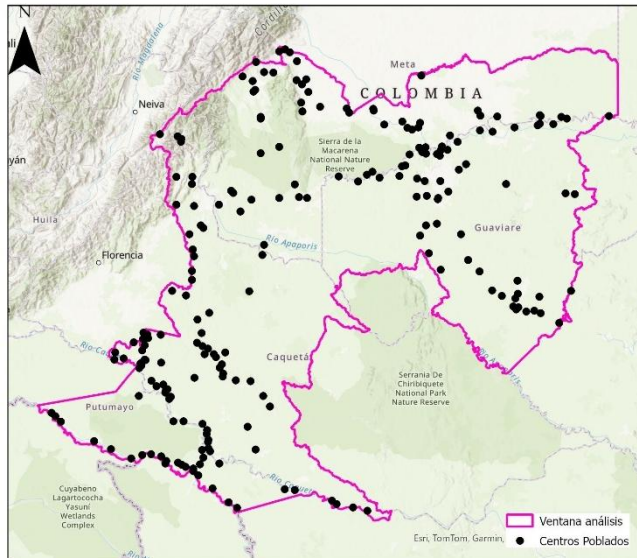
Accesos viales



Capa de los accesos viales año 2024 para el arco de deforestación amazónico

Fuente: (FCDS 2024)

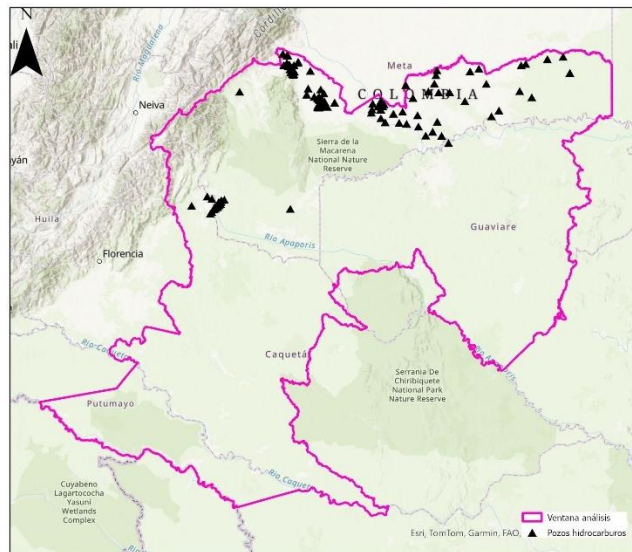
Asentamientos



Capa nacional de centros poblados año 2022

Fuente: IGAC 2022

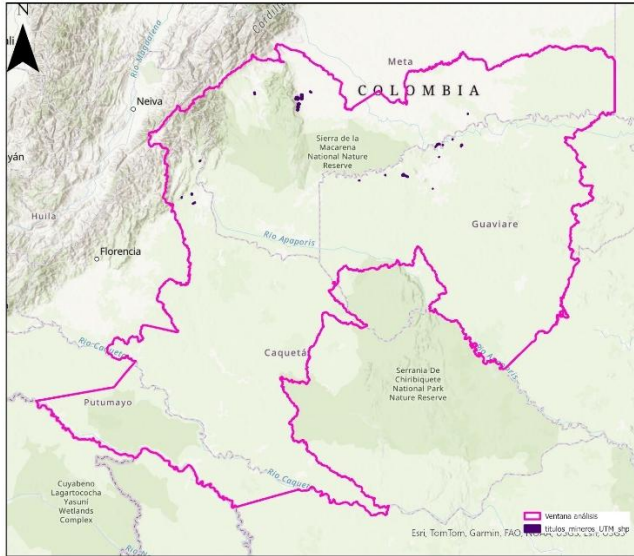
Pozos hidrocarburos



Capa nacional de pozos de hidrocarburos

Fuente: ANH 2024

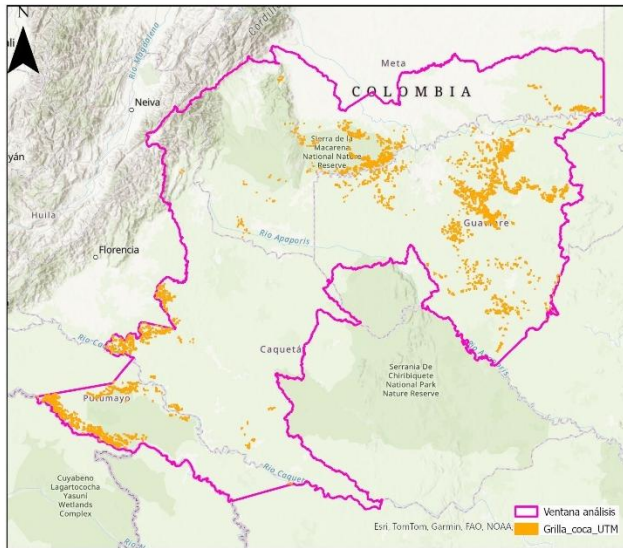
Explotación minera



Capa nacional
catastro minero
2022

Fuente: ANM 2024

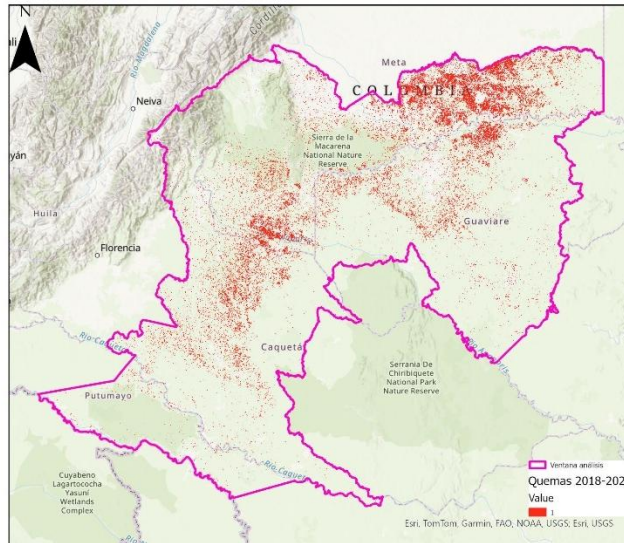
Cultivos de coca



Capa nacional de
cultivos de coca
2023

Fuente: Ministerio
de Justicia y el
Derecho - UNODC
2024

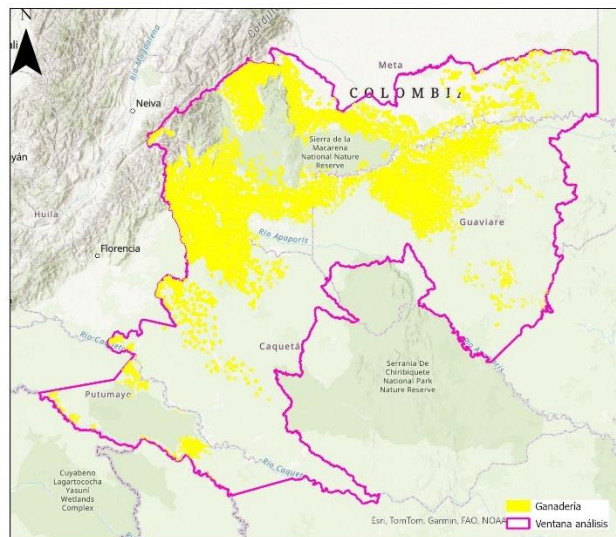
Quemas



Capa de cicatrices de quemas 2018 -2024

Elaboración propia. Algoritmo en Google Earth Engine con imágenes del satélite Sentinel 2

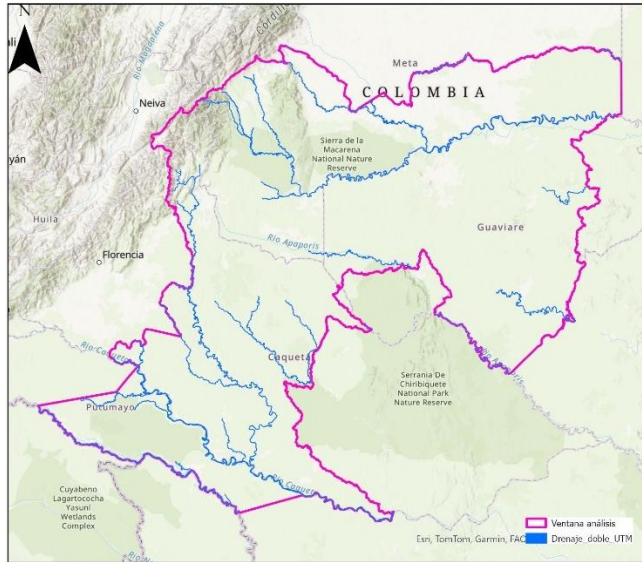
Ganadería



Capa de pastos para ganadería 2022 - 2023

Elaboración propia con teledetección de corrales y pozos de agua con imágenes ESRI 2023 y pastos de las coberturas de la Tierra (SINCHI 2023)

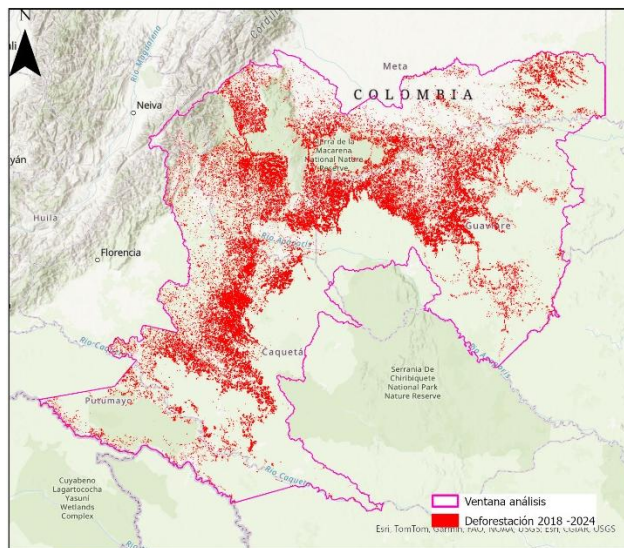
Accesos Fluviales



Capa nacional de drenajes dobles 2022

Fuente: IGAC 2022

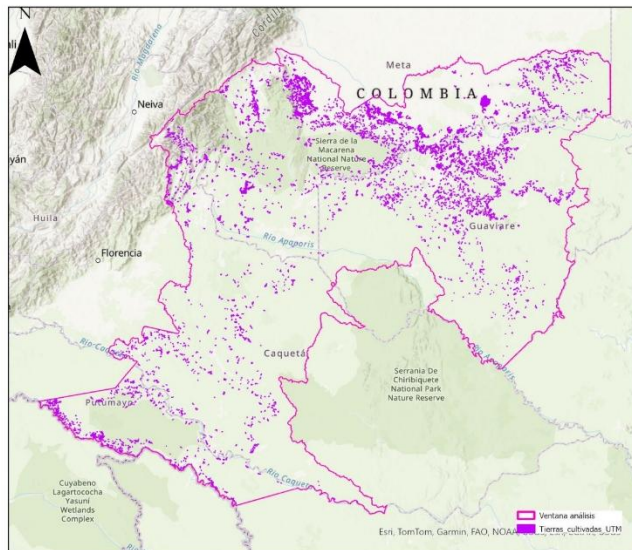
Deforestación



Capa de deforestación 2018 -2024

Fuente: FCDS 2024

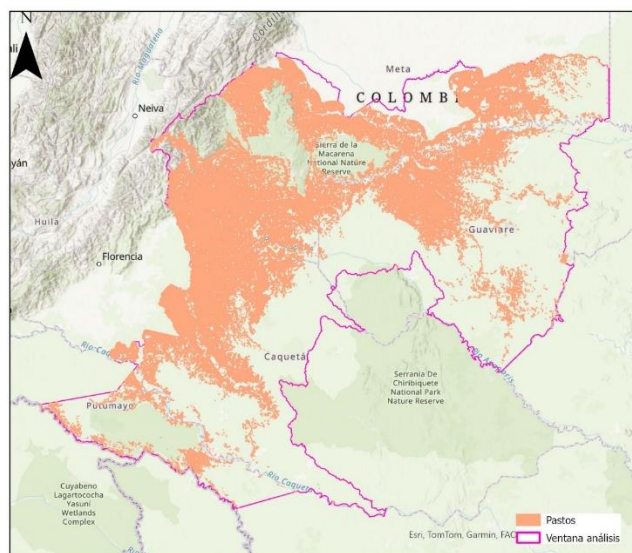
Tierras cultivadas



Capa de coberturas
cultivadas
2023

Fuente: SINCHI
2023

Pastos



Capa de pastos
2023

Fuente: SINCHI
2023

Bibliografía

Acevedo Bohórquez, I., Velásquez Ceballos, E. (2008). Algunos conceptos de la econometría espacial y el análisis exploratorio de datos espaciales. *Ecos de Economía*, 12(27), 9-34. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3290/329027263007.pdf>

Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH. (2024). Geovisor Agencia Nacional de Hidrocarburos. <https://geovisor.anh.gov.co/tierras/>

Agudelo-Hz, W. J., Castillo-Barrera, N. C., y Uriel, M. G. (2023). Scenarios of land use and land cover change in the Colombian Amazon to evaluate alternative post-conflict pathways. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29243-2>

Aguiar, A. P. D., Câmara, G., y Escada, M. I. S. (2007). Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. *Ecological Modelling*, 209(2-4), 169-188. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.06.019>

Altawell, N. (2022). Introduction to Machine Olfaction Devices. MOD data and data análisis. (47-62). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822420-5.00009-X>

Arcila, O. (2010). *La Amazonia colombiana urbanizada: un análisis de sus asentamientos humanos*. Bogotá, Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas-Sinchi. ISBN: 978-958-8317-64-9

- Armenteras, D., Rudas, G., Rodriguez, N., Sua, S., y Romero, M. (2006). Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon. *Ecological Indicators*, 6(2). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.014>
- Armenteras, D., Retana, J. (2012). Dynamics, Patterns and Causes of Fires in Northwestern Amazonia. *PLoS One* 7, e35288. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035288>
- Armenteras, D., Murcia, U., González, T. M., Barón, O. J., y Arias, J. E. (2019). Scenarios of land use and land cover change for NW Amazonia: Impact on forest intactness. *Global Ecology and Conservation*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00567>
- Ball, J. G. C., Petrova, K., Coomes, D. A., y Flaxman, S. (2022). Using deep convolutional neural networks to forecast spatial patterns of Amazonian deforestation. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(11), 2622-2634. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13953>
- Barber, C. P., Cochrane, M. A., Souza, C. M., y Laurance, W. F. (2014). Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. *Biological Conservation*, 177, 203-209. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004>
- Bax, V., Francesconi, W., y Quintero, M. (2016). Spatial modeling of deforestation processes in the Central Peruvian Amazon. *Journal for Nature Conservation*, 29, 79-88. <https://doi.org/10.1016/J.JNC.2015.12.002>
- Berenguer, E., Armenteras, D., Lees, A. C., Fearnside, P. M., Alencar, A., Almeida, C., Aragão, L., Barlow, J., Bilbao, B., Brando, P., Bynoe, P., Finer, M., Flores, B. M., Jenkins, C. N., Silva, C., Smith, C., Souza, C., García-Vilacorta, R., y Nascimento, N. (2024). Drivers and ecological impacts of deforestation and forest degradation in the Amazon. En *Acta Amazonica* (Vol. 54, Número spe1). Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202203420>

- Botero, R. (2023). A Roadmap for Forest Protection in Post-Conflict Colombia. *NACLA Report on the Americas*, 55(2), 140-147. <https://doi.org/10.1080/10714839.2023.2213088>
- Buzai, G. (2024). Matriz geográfica. Contexto y potencialidad en el análisis espacial cuantitativo. *Revista Universitaria de Geografía*. 33, 11-43. <https://doi.org/10.52292/j.rug.2024.33.2.0072>
- Camacho, F. (2022). Logistic Regression Analysis Applied to Spatial Modeling of Deforestation Drivers in Guaviare Department for the Period 2005-2020 and Projection of Deforestation Scenarios to 2030. Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.98012>
- Cardoso, D., Särkinen, T., Alexander, S., Amorim, A.M., Bittrich, V., Celis, M., Daly, D.C., Fiaschi, P., Funk, V.A., Giacomini, L.L., Goldenberg, R., Heiden, G., Iganci, J., Kelloff, C.L., Knapp, S., Cavalcante de Lima, H., Machado, A.F.P., dos Santos, R.M., Mello-Silva, R., Michelangeli, F.A., Mitchell, J., Moonlight, P., de Moraes, P.L.R., Mori, S.A., Nunes, T.S., Pennington, T.D., Pirani, J.R., Prance, G.T., de Queiroz, L.P., Rapini, A., Riina, R., Rincon, C.A.V., Roque, N., Shimizu, G., Sobral, M., Stehmann, J.R., Stevens, W.D., Taylor, C.M., Trovó, M., van den Berg, C., van der Werff, H., Viana, P.L., Zartman, C.E., Forzza, R.C. (2017). Amazon plant diversity revealed by a taxonomically verified species list. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, 10695-10700. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706756114>
- Chen, Y. Spatial autocorrelation equation based on Moran's index. (2023). *Scientific Reports* 13:19296. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45947-x>
- Clerici, N., Armenteras, D., Kareiva, P., Botero, R., Ramírez-Delgado, J. P., Forero-Medina, G., ... y Biggs, D. (2020). Deforestation in Colombian protected areas increased

- during post-conflict periods. *Scientific reports*, 10(1), 1-10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-61861-y>
- Cochrane, M. A., y Barber, C. P. (2009). Climate change, human land use and future fires in the Amazon. *Global Change Biology*, 15(3), 601-612.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01786.x>
- Cushman, S. A., Macdonald, E. A., Landguth, E. L., Malhi, Y., y Macdonald, D. W. (2017). Multiple-scale prediction of forest loss risk across Borneo. *Landscape Ecology*, 32(8), 1581-1598. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0520-0>
- Dalagnol, R., Wagner, F. H., Galvão, L. S., Braga, D., Osborn, F., Sagang, L. B., da Conceição Bispo, P., Payne, M., Silva Junior, C., Favrichon, S., Ciais, P., y Saatchi, S. (2023). Mapping tropical forest degradation with deep learning and Planet NICFI data. *Remote Sensing of Environment*, 298.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113798>
- Environmental Systems Research Institute - ESRI (2025). Análisis de patrón espacial. Tomado de: <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/spatial-pattern-analysis>
- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S., y Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114(2-4). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.013>
- Etter, A., McAlpine, C., y Possingham, H. (2008). Historical patterns and drivers of landscape change in Colombia since 1500: A regionalized spatial approach. *Annals of the Association of American Geographers*, 98(1), 2-23.
<https://doi.org/10.1080/00045600701733911>
- Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible – FCDS (2022). Seguimiento de la pérdida de bosques y cambio de cobertura en el arco de deforestación en la Amazonia Colombiana (abril 2021 - marzo 2022), Bogotá, Colombia.

https://observatorioamazonia.fcds.org.co/fichas/deforestacion/deforestacion-bioma/08-descargables/descargables/arco_deforestacion_2022.pdf

Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible – FCDS (2024). Observatorio de Conflictos Socioambientales de la Amazonia. Geovisor de conflictos socioambientales. Infraestructura vial. <https://apps.fcds.org.co/portal/apps/webappviewer/index.html?id=ec6a324d74064311a8a8a1e68e107deb>

Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible – FCDS (2024). Observatorio de Conflictos Socioambientales de la Amazonia. Geovisor de conflictos socioambientales. Deforestación. <https://apps.fcds.org.co/portal/apps/webappviewer/index.html?id=ec6a324d74064311a8a8a1e68e107deb>

Fearnside, P. M. (2015). Highway Construction as a Force in the Destruction of the Amazon Forest. En Handbook of Road Ecology. <https://doi.org/10.1002/9781118568170.ch51>

Figueiredo, B. (2024). Amazon deforestation: A dangerous future indicated by patterns and trajectories in a hotspot of forest destruction in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120354>

García, M. La deforestación: una práctica que agota nuestra biodiversidad. (2016). SciELO. <http://dx.doi.org/10.22507/pml.v11n2a13>

Geist, H. J., y Lambin, E. F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical Deforestation. *BioScience*, 52(2), 143-150.

Gavlak, A. A., Escada, M. I. S., Miguel, A., y Monteiro, V. (2011). Dinâmica de padrões de mudança de uso e cobertura da terra na região do Distrito Florestal Sustentável da BR-163. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba,*

PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.6152
<https://scholar.google.com/citations?user=IVEHMMgAAAAJ&hl=pt-BR>

González, C. J., Arnaldo, V. E., Malagón, C., Torres, D. A., Fredy, C., Guío, A., Nidia, B., Castillo, P., Maddy, A., Munévar, A., Walter, P., Gil, J., Milton, R., Carabuena, F., Juan, M., Cubillos, F., Adriana, R., Agudelo, P., Elkin, C., ... Rojas, F. G. (2025). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. INVIAS.

González, J. Cubillos, A., Chadid, M., Cubillos, A., Arias, M., Zúñiga, E., Joubert, F. Pérez, I, Berrío, V. (2018). Caracterización de las principales causas y agentes de la deforestación a nivel nacional período 2005-2015. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales– IDEAM-. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Programa ONU-REDD Colombia. Bogotá, 2018.

González, G. I., Gómez, L. A. (2020). Vía al bosque amazónico ¿para qué y cómo? Preguntas clave. En Revista Colombia Amazónica 2019 (2019.a ed.). SINCHI. Disponible en: <https://fcds.org.co/wp-content/uploads/2021/03/via-al-bosque-amazonico-fcds.pdf>

Goodchild, M., y Haining, R. (2005). SIG y análisis espacial de datos: perspectivas convergentes. Investigaciones regionales, ISSN 1695-7253, N°. 6, 2005, pags. 175-202. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/28129000_SIG_y_analisis_espacial_de_datos_perspectivas_convergentes

Guerra, A., Roque, F. D. O., Garcia, L. C., Ochoa-Quintero, J. M. O., Oliveira, P. T. S. D., Guariento, R. D., Rosa, I. M. D. (2020). Drivers and projections of vegetation loss in the Pantanal and surrounding ecosystems. *Land Use Policy*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104388>

Hartmann, F., Kopp, J., Lois, D. (2023). *Social Science Data Analysis*. Springer, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-41230-2>

Hernández-Nariño, A., Medina-Nogueira, Y., Camero-Benavides, L., Almeda-Díaz, L., Díaz-Luis, G., Hernández-Castro, A. (2021). Priorización de la investigación para potenciar la ciencia y la innovación en salud: propuesta metodológica. *Revista Científica*. 43. 141-157. doi:10.14483/23448350.18173

Hoffmann, C., García Márquez, J.R., Krueger, T. (2018). A local perspective on drivers and measures to slow deforestation in the Andean-Amazonian foothills of Colombia. *Land Use Policy* 77, 379-391. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55283-3>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2025). Municipios, Distritos y Áreas no municipalizadas de Colombia. Colombia en mapas. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.66306750976615,-1.8753234865674409,-65.83201282227063,11.88104157468209,4686&b=igac&u=0&t=29&servicio=610>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2022). Base de datos vectorial básica. Colombia. Escala 1:100.000. Centros Poblados. Colombia en mapas. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.66306750976614,-1.8784752954619761,-65.83201282227061,11.877955613394604,4686&b=igac&u=0&t=23&servicio=205>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2022). Base de datos vectorial básica. Colombia. Escala 1:100.000. Drenajes Dobles. Colombia en mapas. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.66306750976614,-1.8784752954619761,-65.83201282227061,11.877955613394604,4686&b=igac&u=0&t=23&servicio=205>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2017). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. Resumen ejecutivo. Tercera

comunicación nacional de Colombia a la convención marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.
<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RESUMEN%20EJECUTIVO%20TCN%20COLOMBIA%20A%20LA%20CMNUCC%202017.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2018). 17 Boletín De Detección Temprana de Deforestación.
<https://bart.ideam.gov.co/smbyc/Boletines%20Detecciones%20Tempranas%20de%20Deforestacion/2018/Boletin/Boletin%2017%20-%20IV%20trimestre%202018.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2014). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. V 2.0.
https://bart.ideam.gov.co/smbyc/Publicaciones/Protocolo%20de%20PDI%20para%20la%20cuantificacion%20de%20la%20deforestacion%20en%20colombia%20v2_1_.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2022). Reportes anuales de monitoreo a la deforestación 2016 – 2021. Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono. Bogotá, Colombia. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Informe-anual-del-monitoreo-de-bosque-y-la-deforestacion>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2023). Proporción de la superficie cubierta por bosque natural. Hoja Metodológica versión 1.3. Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono. Bogotá, Colombia. http://archivo.ideam.gov.co/documents/11769/648879/HM+Cambio+bosque+natural_20082019.pdf/31e23716-0414-42e8-9fba-064e45bc0e6c

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2024). Monitoreo de la superficie de bosque y la deforestación en Colombia – 2023 (resumen de

resultados) Bogotá, Colombia. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Informe-anual-del-monitoreo-de-bosque-y-la-deforestacion>

Instituto SINCHI. (2020). Sistema de Monitoreo de las Coberturas de la tierra de la Amazonia colombiana. Coberturas de la Tierra de la Amazonia colombiana para el año 2020. Escala: 1:100.000. https://datos.siatac.co/pages/coberturas?_gl=1*12xgcd0*_ga*MTgyMzAxNTY4Ni4xNzYzNjU0ODQz*_ga_EJJVVKDE7K*czE3NjM2NTQ4NDIkbzEkZzEkdDE3NjM2NTUwNTckajU5JGwwJGgw

Instituto SINCHI. (2023). Sistema de Monitoreo de las Coberturas de la tierra de la Amazonia colombiana. Coberturas de la Tierra de la Amazonia colombiana para el año 2023. Escala: 1:100.000. https://datos.siatac.co/pages/coberturas?_gl=1*12xgcd0*_ga*MTgyMzAxNTY4Ni4xNzYzNjU0ODQz*_ga_EJJVVKDE7K*czE3NjM2NTQ4NDIkbzEkZzEkdDE3NjM2NTUwNTckajU5JGwwJGgw

Instituto SINCHI. (2024). Sistema de Monitoreo de las Coberturas de la tierra de la Amazonia colombiana. Coberturas de la Tierra de la Amazonia colombiana para el año 2024. Escala: 1:100.000. https://datos.siatac.co/pages/coberturas?_gl=1*12xgcd0*_ga*MTgyMzAxNTY4Ni4xNzYzNjU0ODQz*_ga_EJJVVKDE7K*czE3NjM2NTQ4NDIkbzEkZzEkdDE3NjM2NTUwNTckajU5JGwwJGgw

IPBES (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>

IPCC (2023). Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Jiménez-Valverde, A. (2011). Insights into the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) as a discrimination measure in species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography*, (Global Ecol. Biogeogr.). 21, 498–507. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00683.x>
- Kaced, D., Mejean, R., Richa, A., Gaudou, B., y Saqalli, M. (2019). PASHAMAMA: An Agricultural Process-Driven Agent-Based Model of the Ecuadorian Amazon. En *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: Vol. 11463 LNAI. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22270-3_5
- Katz-Asprilla, D., Marie-Gabrielle, P., Briceño, G., Blanc., Camacho, J., Karsenty, a. (2024). Subnational assessment of legal and illegal deforestation in the Colombian Amazon: consequences for zero deforestation commitments. *Regional Environmental Change*, 24:108. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02264-x>
- Kazadi, S.-N., Yoshikawa, S. (2009). Deforestation dynamics in Mato Grosso, central-west Brazil using GIS and NOAA/AVHRR data. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference 2009, ASPRS 2009*, 1, 391-397.
- Kleinbaum, D. G., Klein, M. (2010). *Logistic Regression A Self-Learning (Third Edition)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1742-3>
- Korting, T. S., Fonseca, L. M. G., Escada, M. I. S., Silva, F. C. D., Silva, M. P. D. S. (2008). GeoDMA A novel system for spatial data mining. *Proceedings - IEEE International Conference on Data Mining Workshops, ICDM Workshops 2008*, 975-978. <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2008.22>

- Lambin, E. F., Geist, H. J., Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Lambin, E. F., Meyfroidt, P. (2010). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27(2), 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.003>
- Laurance, W. F., Albernaz, A. K. M., Schroth, G., Fearnside, P. M., Bergen, S., Venticinque, E. M., Da Costa, C. (2002). Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Biogeography*, 29(5-6), 737-748. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00721.x>
- Leal, C. G., Pompeu, P. S., Gardner, T. A., Leitão, R. P., Hughes, R. M., Kaufmann, P. R., Zuanon, J., de Paula, F. R., Ferraz, S. F. B., Thomson, J. R., Ferreira, J., Barlow, J. (2016). Multi-scale assessment of human-induced changes to Amazonian instream habitats. *Landscape Ecology*, 31(8), 1725-1745. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0358-x>
- Ley 1228 de 2018. Por la cual se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio o áreas de exclusión, para las carreteras del sistema vial nacional, se crea el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras y se dictan otras disposiciones. Publicada en el Diario Oficial 47.052 de julio 16 de 2008. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=31436>
- Martínez, R., Tuyas, L., Martínez, M., Pérez, A., y Cánovas, A. (2009). EL COEFICIENTE DE CORRELACION DE LOS RANGOS DE SPEARMAN CARACTERIZACION. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2). <https://www.redalyc.org/pdf/1804/180414044017.pdf>
- McGarigal, K. (1995). *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure*. United States Department of Agriculture.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2021a). Producto Final. Plan Amazónico de Transporte Intermodal Sostenible. Contrato de consultoría N° VA-CCON-037-2021.

https://visionamazonia.minambiente.gov.co/content/uploads/2023/03/P11_Documento-del-Plan-Amazonico-de-Transporte-Intermodal-Sostenible-PATIS.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2021b). Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas – POMCAS. Colombia en mapas. IGAC.

<https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.66306750976615,->

[1.8753234865674409,-](https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.66306750976615,-1.8753234865674409,-)

[65.83201282227063,11.88104157468209,4686&b=igac&u=0&t=30&servicio=146](https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.66306750976615,-1.8753234865674409,-65.83201282227063,11.88104157468209,4686&b=igac&u=0&t=30&servicio=146)

[5](https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.66306750976615,-1.8753234865674409,-65.83201282227063,11.88104157468209,4686&b=igac&u=0&t=30&servicio=146)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2020). Lineamientos de Infraestructura Verde Vial para Colombia (LIVV). Agenda Ambiental Interministerial.

<https://mintransporte.gov.co/publicaciones/10780/lineamientos-infraestructura-verde-vial/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2024). Metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales. Autoridad Nacional de

Licencias Ambientales. <https://www.minambiente.gov.co/consulta/resolucion-por-la-cual-se-adopta-la-metodologia-general-para-la-elaboracion-y-presentacion-de-estudios-ambientales-y-se-toman-otras-determinaciones-2/>

Ministerio de Justicia y el Derecho. (2024). Detección de Cultivos de Coca (hectáreas).

Ministerio de Justicia y el derecho en convenio con Naciones Unidas. Portal de datos abiertos. https://www.datos.gov.co/Justicia-y-Derecho/Deteccion-de-Cultivos-de-Coca-hect-reas-/acs4-3wgp/about_data

Magliocca, N. R., Rudel, T. K., Verburg, P. H., McConnell, W. J., Mertz, O., Gerstner, K., Heinemann, A., Ellis, E. C. (2015). Synthesis in land change science: Methodological

patterns, challenges, and guidelines. *Regional Environmental Change*, 15(2), 211-226. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0626-8>

McHugh, M. (2013). The chi-square test of independence. *Biochem Med (Zagreb)*, 23(2):143-9. <http://dx.doi.org/10.11613/BM.2013.018>

Mendivelso, F., Rodríguez, M. (2022). Prueba no paramétrica de correlación de Spearman. *Revista Médica Sanitas*, 24(1). <https://doi.org/10.26852/01234250.578>

Metzger, M.J., Rounsevell, M.D.A., Acosta-Michlik, L., Leemans, R., Schröter, D. (2006). The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114, 69-85. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.025>

Montgomery, D., Peck, E., Vining, G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley, 5th edition, 2012. https://www.kwcsangli.in/uploads/3--Introduction_to_Linear_Regression_Analysis__5th_ed._Douglas_C._Montgomery__Elizabeth_A._Peck__and_G_.pdf

Morais, P. D. P., Arima, E. Y., de Souza, N., Pereira, R. S., Emmert, F., Cardoso, R. M., Miguel, E. P., Matricardi, E. A. T. (2023). Assessment of Forest Road Models in Concession Areas in the Brazilian Amazon. *Forests*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/f14071388>

Murillo-Sandoval, P. J., Van Dexter, K., Van Den Hoek, J., Wrathall, D., Kennedy, R. (2020). The end of gunpoint conservation: forest disturbance after the Colombian peace agreement. *Environmental Research Letters*, 15(3), 034033. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6ae3>

Murillo-Sandoval, P. J., Clerici, N., Correa-Ayram, C. (2022). Rapid loss in landscape connectivity after the peace agreement in the Andes-Amazon region. *Global Ecology and Conservation*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02205>

- Murad, C.A., Pearse, J. (2018). Landsat study of deforestation in the Amazon region of Colombia: Departments of Caquetá and Putumayo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 11, 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.07.003>
- Murphy, L. L. (2001). Colonist farm income, off-farm work, cattle and differentiation in Ecuador's Northern Amazon. *Human Organization*, 60(1), 67-79. <https://doi.org/10.17730/humo.60.1.38rjx0aldu349vvh>
- Organización de las Naciones Unidas (2022). COP26: Juntos por el planeta. Pacto de Glasgow para el Clima. Tomado de: <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>
- Organización del Tratado de Cooperación Amazónica - OTCA (2025). ¿Quiénes somos? Entienda la importancia de la OTCA Tomado de: <https://otca.org/quienes-somos/#:~:text=Entienda%20la%20importancia%20de%20la,de%20la%20implementaci%C3%B3n%20del%20TCA.>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura la Alimentación – FAO (2021). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. En Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Perz, S., Brilhante, S., Brown, F., Caldas, M., Ikeda, S., Mendoza, E., Overdevest, C., Reis, V., Reyes, J. F., Rojas, D., Souza, C., Walker, R. (2008). Road building, land use and climate change: Prospects for environmental governance in the Amazon. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1498), 1889-1895. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0017>
- Perez Angie (2020). Tesis de grado " DEFORESTACIÓN EN LA AMAZONIA COLOMBIANA Y PERUANA (2015-2018): UN ANÁLISIS DESDE EL ECOFEMINISMO." Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencia Política y Relaciones Internacionales. Carrera De Relaciones Internacionales. Bogotá D.C

- Phillips, O.L., Lewis, S.L., Baker, T.R., Chao, K.J., Higuchi, N. (2008). The changing Amazon forest. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 363, 1819-1827. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0033>
- Pimm, S., Raven, P. Extinction by numbers. *Nature* 403, 843–845 (2000). <https://doi.org/10.1038/35002708>.
- Prem, M., Saavedra, S., Vargas, J. F. (2020). End-of-conflict deforestation: Evidence from Colombia's peace agreement. *World Development*, 129, 104852. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104852>
- Quinlan, by J. R., Publishers, M. K., Salzberg, S. L. (1994). *Programs for Machine Learning* (Vol. 16, pp. 235-240).
- RAISG (2020). Amazona en números. Datos preparados por la RAISG y mostrados en forma gráfica. Tomado de: <https://www.raisg.org/es/infografia/?location=Col%C3%B4mbia>
- Rojas, E., Zutta, B. R., Velazco, Y. K., Montoya-Zumaeta, J. G., Salvà-Catarineu, M. (2021). Deforestation risk in the Peruvian Amazon basin. *Environmental Conservation*, 48(4), 310-319. <https://doi.org/10.1017/S0376892921000291>
- Rosa, I. M. D., Purves, D., Carreiras, J. M. B., Ewers, R. M. (2015). Modelling land cover change in the Brazilian Amazon: Temporal changes in drivers and calibration issues. *Regional Environmental Change*, 15(1), 123-137. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0614-z>
- Sánchez-Solis, Y., Raqui-Ramirez, C., Huaroc-Ponce, E., y Huaroc-Ponce, N. (2024). Importancia de Conocer la Normalidad de los Datos Utilizados en los Trabajos de Investigación por Tesistas. *Revista Tecnológica-Educativa Docentes 2.0*, 17(2), 404-413. Epub 14 de abril de 2025. <https://doi.org/10.37843/rtd.v17i2.554>

- Senarath, U. (2021). Waterfall Methodology, Prototyping and Agile Development. DOI:10.13140/RG.2.2.17918.72001.
- SINCHI (Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas). 2018. Metodología homologada para realizar estudios de fragmentación, motores de fragmentación y Conectividad ecológica del paisaje amazónico colombiano, en tres diferentes ámbitos de alcance geográfico: regional, subregional y local. Proyecto Conservación de Bosques y Sostenibilidad en el corazón de la Amazonia., Bogotá D.C.
- Silva, C. F. A. da, Andrade, M. O. de, Santos, A. M. dos, Melo, S. N. de. (2023). Road network and deforestation of indigenous lands in the Brazilian Amazon. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103735>
- Soares-Filho, B., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G., Del Carmen Vera Diaz, M., Rivero, S., Solórzano, L., Voll, E. (2004). Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: The Santarém-Cuiabá corridor. *Global Change Biology*, 10(5), 745-764. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00769.x>
- Tejada, G., Dalla-Nora, E., Cordoba, D., Laforteza, R., Ovando, A., Assis, T., Aguiar, A. P. (2016). Deforestation scenarios for the Bolivian lowlands. *Environmental Research*, 144, 49-63. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.10.010>
- Tempa, K., Ilunga, M., Agarwal, A., Tashi. (2024). Utilizing Sentinel-2 Satellite Imagery for LULC and NDVIChangeDynamics for Gelephu, Bhutan. *Appl. Sci.* 14, 1578. <https://doi.org/10.3390/app14041578>

UNODC. (2004). *Censo de Cultivos de Coca Junio de 2005*. Oficina contra la droga y el delito Gobierno de Colombia.

Verburg, P. H., Crossman, N., Ellis, E. C., Heinimann, A., Hostert, P., Mertz, O., Nagendra, H., Sikor, T., Erb, K.-H., Golubiewski, N., Thomson, A., Zhen, L. (2015). Land system science and sustainable development of the earth system: A global land project perspective. *Anthropocene*, 12, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2015.09.004>

Yoshikawa, S., Sanga-Ngoie, K. (2011). Deforestation dynamics in Mato Grosso in the southern Brazilian Amazon using GIS and NOAA/AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 32(2), 523-544. <https://doi.org/10.1080/01431160903475225>