

**METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE RUTAS SOCIO-AMBIENTALMENTE
SOSTENIBLES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN. CASO DE ESTUDIO LINEA DE
TRANSMISIÓN A 115 kV PURNIO-DORADA NORTE.**

CARLOS MARIO CRUZ MARÍN



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES®**



Acreditación Institucional
de Alta Calidad
Resolución 4792 del 15 de mayo de 2019

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2020**

**METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE RUTAS SOCIO-AMBIENTALMENTE
SOSTENIBLES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN. CASO DE ESTUDIO LINEA DE
TRANSMISIÓN A 115 kV PURNIO-DORADA NORTE.**

CARLOS MARIO CRUZ MARÍN

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2020**

CONTENIDO

1.	ÁREA PROBLEMÁTICA.....	6
2.	OBJETIVOS	8
2.1.	OBJETIVO GENERAL	8
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
3.	JUSTIFICACIÓN	9
4.	REFERENTE TEÓRICO.....	10
4.1.	PROYECTO NUEVA SUBESTACIÓN DORADA NORTE.....	10
4.2.	REFERENTE NORMATIVO.....	11
4.3.	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA – SIG.....	12
4.4.	DISTANCIA EUCLIDIANA.....	13
4.5.	SUPERPOSICIÓN PONDERADA (weighted overlay).....	13
4.6.	PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO	13
4.7.	RUTA DE MENOR COSTO.....	14
4.6.1.	Costo de distancia:	14
4.6.2.	Vínculo de menor costo:	14
4.7.	FOTOGRAMETRÍA.....	14
4.8.	ANTECEDENTES	16
5.	METODOLOGÍA	18
5.1.	TIPO DE TRABAJO.....	18
5.2.	PROCEDIMIENTO	18
5.2.1.	Recolección de información secundaria.	18
5.2.2.	Evaluación multicriterio.....	20
5.2.3.	Ruta de menor costo.....	23
5.2.4.	Geoprocesamiento desarrollado en model buider.....	24
5.2.5.	Fotogrametría.....	25
6.	RESULTADOS.....	26
7.	CONCLUSIONES	30
8.	RECOMENDACIONES.....	31
9.	BIBLIOGRAFÍA	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Proyecto	11
Figura 2. Amenazas Naturales	18
Figura 3. Áreas de Interés Ambiental	19
Figura 4. Infraestructura presente en el área de interés	19
Figura 5. Distancia euclidiana y reclasificada de la capa infraestructura.	20
Figura 6. Ejecución análisis multicriterio en ArcGIS	22
Figura 7. Superposición ponderada de las diferentes variables utilizadas	23
Figura 8. ejecución de los algoritmos de vínculo de menor costo y costo de distancia	24
Figura 9. Proceso cálculo de mejor ruta para línea de transmisión	24
Figura 10. Alineación de las fotografías aéreas.	25
Figura 11. creación de nube de puntos	25
Figura 12. Amenazas Naturales y ruta óptimas	26
Figura 13. Infraestructura y ruta óptima	27
Figura 14. Áreas de interés ambiental y ruta óptima	27

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables tenidas en cuenta y determinación de pesos	21
--	----

GLOSARIO

ArcGIS: Sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

Fotogrametría: Técnica que tiene como objetivo el estudio y la definición precisa de la forma, las dimensiones y/o la posición en el espacio de un objeto, a través de los datos obtenidos de una o varias fotografías.

Líneas de transmisión de energía: Medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica, está constituida por: conductores, estructuras de soporte, aisladores, accesorios de ajustes entre aisladores y estructuras de soporte, y cables de guarda.

Ortofoto: Imagen producto de la toma de fotografías aéreas o satelitales, en la cual han sido corregidos los desplazamientos causados por la inclinación de la cámara o sensor y la curvatura de la superficie del terreno.

Fotomosaico: composición de imagen hecha por varias fotografías aéreas, las cuales tienen la posición corregida para dar la apariencia de ser una solo foto.

RESUMEN

El presente trabajo propone una metodología para definir un trazado de una línea de transmisión entre la subestación Purnio y la nueva subestación Dorada Norte de 115 kV que sea amigable con el medio ambiente, y que considere variables sociales como la infraestructura existente en el territorio. Para la ejecución del trabajo se utilizaron herramientas SIG de análisis espacial como distancias euclidianas, superposición ponderada, costo de distancias, vínculos de menor costo, ruta de menor costo, y se utilizaron técnicas de fotogrametría con el objetivo de recopilar información primaria del territorio. Las variables tenidas en cuenta para la ejecución del presente trabajo fueron áreas de protección ambiental, infraestructura existente y amenazas naturales.

PALABRAS CLAVES: SIG, líneas de transmisión de energía, Ruta de bajo costo, Plan básico de ordenamiento territorial.

ABSTRACT

In this study, a methodology is proposed to define a powerline route between the existing Purnio substation and the new Dorada Norte substation, than is friendly to the environment, and that considers social variables such as the existing infrastructure in the territory. For the execution of the study, spatial analysis such as Euclidean distances, weighted overlay, cost distance, cost back link, least-cost, path were used. photogrammetry techniques were used with the objective of collecting primary information on the territory. The variables taken into account for the execution of this work were areas of environmental protection, existing infrastructure and natural hazards.

KEY WORDS: GIS, energy powerlines, least-cost path, Territorial Arrangement Plan.

INTRODUCCIÓN

La Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC S.A E.S.P es una empresa que genera, distribuye, transmite y comercializa energía, para ello cuenta con 471 kilómetros de líneas de transmisión a 115 kilovoltios y 17 subestaciones del mismo nivel de tensión en los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda, impactando una población de 1.470.304 habitantes.

Con el objetivo de ampliar la cobertura del sistema de transmisión y mejorar la confiabilidad del sistema existente, la empresa está desarrollando una serie de proyectos que requieren de la construcción de nuevas líneas de transmisión.

Las líneas de transmisión de este nivel de tensión se construyen por lo general en zonas rurales y pueden impactar ecosistemas de importancia a nivel nacional y regional incluyendo áreas protegidas en todas sus diferentes clasificaciones.

El trabajo se realizó basado en herramientas SIG de análisis espacial, las cuales son de una gran importancia para la ejecución de proyectos de infraestructura en todas sus fases; ya que las mismas nos permiten en etapas tempranas por medio de información secundaria y primaria tomar decisiones de gran importancia, lo que dará como resultado la viabilización de proyectos, menores impactos ambientales, cumplimiento de cronogramas y anticipar gastos que pudieran afectar el presupuesto del proyecto.

El presente trabajo propone un modelo de trazados de ruta para este tipo de líneas de transmisión, que sirva para encontrar las alternativas más adecuadas, evitando el impacto en áreas protegidas tanto nacionales como regionales, y a su vez, identifique las opciones viables más cortas en distancia que permitan la factibilidad económica de los proyectos.

Esta clase de líneas por su nivel de tensión de 115 kV, están sujetas a un licenciamiento ambiental ante las Corporaciones Autónomas Regionales, según lo ordenado por el Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, razón por la cual, esta propuesta servirá para obtener mejores datos en etapas tempranas del proyecto, evitando retrasos en la obtención de licencias ambientales y sobrecostos a la hora de ejecución de los mismos.

Adicionalmente y una vez el trazado este definido, la metodología objeto del presente estudio permitirá obtener por medio de imágenes tomadas con drones, una fotogrametría que a su vez generará una Ortofoto, y esta última, facilitará la estimación de los aprovechamientos forestales de las servidumbres de la línea y confirmará los tipos de cobertura presentes en el área de influencia del proyecto mediante información actualizada; de igual forma, la propuesta también

facilitará la obtención de modelos de elevación digital que son aquellos que permiten realizar los diseños técnicos de las líneas en la fase de factibilidad de los proyectos.

En la gestión ambiental de un proyecto actualmente, uno de los impactos ambientales más representativos y costoso de manejar es el aprovechamiento forestal. Por lo cual con la presente metodología se espera obtener valores acertados de la cantidad de la flora susceptible de afectación necesaria para la ejecución de un proyecto y su respectiva compensación; a su vez, permitirá realizar un análisis para encontrar zonas en las que probablemente se puedan establecer las mismas. Esto es una información muy importante para etapas posteriores de los proyectos como la elaboración de los estudios de impacto ambiental, necesarios para el licenciamiento ambiental de los proyectos ante las autoridades.

En resumen, esta metodología no solo permite la selección de los mejores trazados de líneas, sino que además facilita la obtención de permisos ambientales y la realización de presupuestos ajustados desde etapas tempranas, otorgando así una mayor viabilidad de los proyectos en su ejecución.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

La Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC S.A E.S.P es una empresa del grupo EPM cuyo objetivo empresarial es la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica en los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda.

Con el objetivo de crecer como empresa e impulsar el progreso de la región, la CHEC busca desarrollar proyectos de inversión, entre los cuales se encuentran la construcción de nuevas líneas de transmisión de energía, con el fin de generar una mayor confiabilidad en el sistema eléctrico ya existente.

Los proyectos lineales de tensión mayores o iguales a 50 kV están sujetos a licenciamiento ambiental según lo ordena el Decreto 1076 de 2015, razón por la cual, es necesario tomar las medidas necesarias para causar impactos ambientales mínimos durante la ejecución y operación de proyectos. Por lo expuesto, se evidenció la necesidad de elaborar un instrumento con el cual se puedan obtener trazados de líneas que eviten impactar ecosistemas protegidos ambientalmente, o en caso de ser necesario, intervenir estas zonas causando el mínimo impacto posible.

La construcción de líneas de transmisión es necesaria para el desarrollo de un país y pueden traer grandes beneficios como por ejemplo la mejora en la calidad de vida de la población, pero también pueden llevar consigo afectaciones a nivel ambiental y socioeconómico, ya que en muchos casos deben cruzar grandes extensiones de tierras rurales y/o urbanas, fragmentando ecosistemas naturales y cambiando el uso actual de la tierra en el área de servidumbre de las mismas.

En su agenda, la CHEC tiene programado el desarrollo de varios proyectos de construcción de líneas de alta tensión de esta índole específicamente en los departamentos de Caldas y Risaralda, por lo que, si bien se debe contemplar la posible afectación de dichos territorios por las circunstancias descritas anteriormente, de no planificarse adecuadamente los proyectos, también se podría incurrir en la afectación económica y reputacional de la empresa.

Para la formulación, diseño y construcción de este tipo de proyectos, existen instrumentos importantes como son: los planes de ordenamiento territorial, la información de las autoridades ambientales del territorio objeto de estudio y los insumos geográficos importantes como imágenes satelitales u ortofotos y modelos de elevación digital; dichos instrumentos permiten obtener datos acertados para realizar una caracterización ambiental, social y económica del territorio y facilitan la recopilación de información técnica esencial para el desarrollo de las

factibilidades del proyecto, lo que evita retrocesos al momento de licenciar ambientalmente e impulsa la realización de presupuestos y cronogramas acertados en etapas previas.

A partir de lo planteado con antelación, surge el siguiente interrogante: ¿es posible mediante los SIG obtener trazados de líneas de transmisión que eviten o minimicen las afectaciones a ecosistemas importantes y así mismo fortalezcan el desarrollo de la etapa de factibilidad en los proyectos?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar una metodología SIG que permita diseñar el trazado de la línea de transmisión que conectará la subestación Purnio CHEC con la nueva subestación Dorada Norte, minimizando la afectación a los ecosistemas de importancia y obteniendo insumos para formular de manera óptima la factibilidad del proyecto.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisión y recolección de información secundaria necesaria para la formulación de proyectos lineales del sector eléctrico.
- Determinar un trazado óptimo para la línea de transmisión, involucrando técnicas como análisis multicriterio y modelos de ruta de menor costo.
- Realizar un proceso fotogramétrico a lo largo de todo el trazado de línea de transmisión seleccionada, con el objetivo de obtener como resultado un Ortomosaico y un modelo digital de terreno que permita recopilar información importante para ser utilizada en fases tempranas de ejecución de proyectos.

3. JUSTIFICACIÓN

Como consecuencia del crecimiento poblacional del país, se hace necesario el desarrollo de nuevos proyectos de infraestructura, con el objetivo de ampliar la cobertura eléctrica en todo el territorio nacional a través de la construcción de subestaciones y líneas de transmisión que permitan la distribución adecuada de energía, creando un sistema más eficiente, efectivo, confiable y garante de las necesidades básicas de los colombianos.

Aportando a las soluciones de cobertura eléctrica dentro de los territorios de su competencia, la Central hidroeléctrica de Caldas CHEC S.A E.S.P cuenta con un plan de expansión en el cual se estipula el desarrollo de varios proyectos desde sus etapas más tempranas (prefactibilidad y factibilidad).

Este tipo de proyectos son necesarios para el desarrollo de un país y para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, pero no es un secreto que los mismos pueden llegar a afectar las condiciones ambientales de muchos ecosistemas si no se planean y ejecutan basados en estudios que tengan rigor técnico y que ayuden a que los impactos causados puedan ser prevenidos, mitigados, evitados o compensados.

En CHEC S.A E.S.P se trabaja pensando en actuar con un enfoque preventivo como lo dicta su política ambiental y con la visión de optimizar sus recursos, razón por la cual, la presente propuesta busca facilitar la toma de decisiones en etapas tempranas de los proyectos, permitiendo obtener presupuestos con altos grados de confiabilidad, disminuir el riesgo de la negación de una licencia ambiental o la demora en la solicitud de los permisos ambientales y por supuesto la mínima afectación de ecosistemas de importancia para el país.

La presente metodología permitirá obtener los trazados de las líneas de transmisión que eviten el paso por áreas de interés ambiental, recolectar información primaria de calidad para la planeación de la ejecución de los proyectos mediante la obtención de ortofotos con buena resolución que faciliten observar la cobertura de la tierra en sus condiciones actuales, y compilar información secundaria necesaria para la ejecución de proyectos, por ejemplo: áreas protegidas nacionales, áreas protegidas en los instrumentos de ordenamiento territorial de las diferentes administraciones e información sobre el uso del suelo permitido en los territorios intervenidos.

4. REFERENTE TEÓRICO

En el presente trabajo se elaboró un modelo SIG para encontrar los trazados ambientalmente óptimos de una línea de transmisión en el marco del proyecto de la nueva subestación Dorada Norte, el cual incluirá la construcción de una línea de transmisión a 115 kV que conectará la nueva subestación con la Subestación Purnio propiedad de CHEC S.A E.S.P, y se realizó una estimación del aprovechamiento forestal necesario para el desarrollo del proyecto mediante la interpretación de una ortofoto generada a partir de un proceso fotogramétrico con imágenes de dron.

4.1. PROYECTO NUEVA SUBESTACIÓN DORADA NORTE

Este proyecto tiene como objetivo garantizar la atención de la demanda en el mediano y largo plazo, así como la operación confiable y segura del sistema eléctrico en condiciones de operación normal y ante contingencia, al igual que apalancar el desarrollo esperado del municipio de la Dorada Caldas.

El proyecto consiste en la construcción de la nueva subestación Dorada Norte 115/33/13,2 Kv, y contempla la construcción de una línea de transmisión a 115 kV que conectará la subestación existente Purnio CHEC con la nueva subestación; esta línea está ubicada en su totalidad en la vereda La Arenosa del municipio de la Dorada, departamento de Caldas.

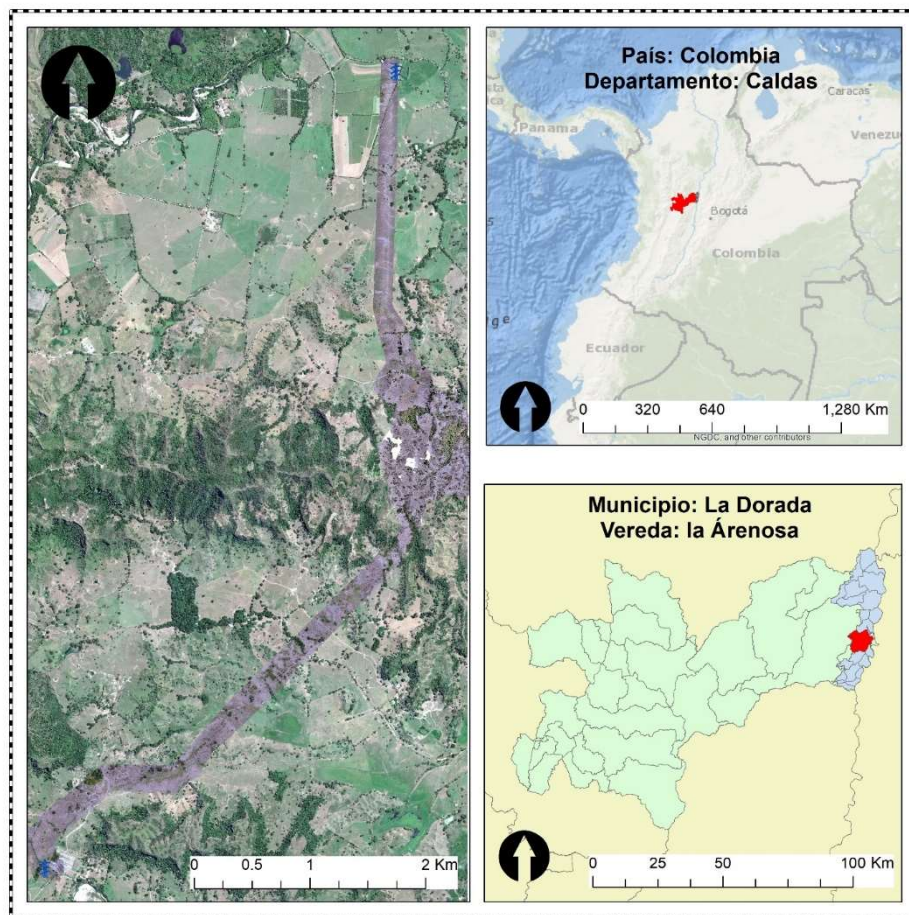


Figura 1. Ubicación Proyecto

4.2. REFERENTE NORMATIVO

Según el artículo 2.2.2.3.2.3 del Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 1076 de 2015, es competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible, los Grandes Centros Urbanos y las autoridades ambientales creadas mediante la Ley 768 de 2002, el otorgamiento o la negación de licencias ambientales para proyectos del sector eléctrico, de acuerdo con el literal b del numeral 4 del artículo en mención:

Artículo 2.2.2.3.2.3. Competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales.

... 4. En el sector eléctrico:

... b) El tendido de líneas del Sistema de Transmisión Regional conformado por el conjunto de líneas con sus módulos de conexión y/o subestaciones, que operen a tensiones entre cincuenta (50) kV y menores a doscientos veinte (220) kV (2015).

Teniendo en cuenta que la nueva línea de transmisión a 115 kV que conectará la subestación Purnio con la nueva subestación Dorada Norte se encuentra en el rango de tensión establecido en

el artículo 2.2.2.3.2.3 del Decreto 1076 de 2015, es necesario solicitar la licencia ambiental para la ejecución de la línea de 115 kV a la Corporación Autónoma Regional de Caldas - Corporacaldas.

Dentro de la licencia ambiental deberán contemplarse los diferentes permisos ambientales asociados al proyecto, tales como: aprovechamiento forestal y levantamiento de veda.

4.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA – SIG

Los sistemas de información geográfica son una mezcla entre hardware, software, datos y usuarios que permiten recopilar, analizar y tomar decisiones a partir de datos recolectados sobre fenómenos que suceden en nuestro planeta.

Con el gran avance tecnológico de los últimos tiempos en temas informáticos, teledetección, sensores remotos, drones, etc.; es posible acceder a información de calidad que sirve para analizar fenómenos sobre lo que pasa en un lugar determinado, tomar decisiones sobre las mejores alternativas para desarrollar un proyecto en un lugar determinado y predecir el comportamiento de los sistemas presentes en el planeta tierra como por ejemplo el clima, entre otros.

Los SIG son una herramienta de análisis que posibilita la optimización de los procesos de planeación técnica y ambiental de los proyectos. Esta herramienta permite reducir los tiempos de diseño, los costos de las obras e integrar adecuadamente las variables múltiples que hacen parte del medio natural y humano con el fin de determinar los lugares de menor impacto, además de agilizar la toma de decisiones (Peláez, 2010).

En la ejecución de proyectos de infraestructura lineales se deben considerar criterios de tipo económico (minimización de los costes de construcción) y ambiental (reducción de los impactos negativos que el trazado de la infraestructura produce) (Bosque Sendra & García, 2010).

En virtud de lo anterior, para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron los SIG para localizar zonas de importancia ecosistémica declaradas por autoridades nacionales o locales y esta información se tuvo en cuenta para determinar el trazado de una nueva línea de transmisión de energía; razón por la cual los SIG fueron usados como una herramienta de toma de decisiones, permitiendo la menor afectación ambiental posible y factibilizando el desarrollo de esta obra de infraestructura.

Entre las técnicas basadas en SIG, una de las más útiles para encontrar un trazado de línea óptimo es la ruta de coste (least-cost path), que permite encontrar la ruta más económica o factible dependiendo de los parámetros tenidos en cuenta por el diseñador. El costo de la superficie es representado por un ráster en el cual cada pixel tiene un valor que define cuánto

cuesta pasar a través de él y para encontrar la mejor alternativa se genera una superficie de costo acumulado (Douglas D. H., 1994). El proceso es llevado a cabo por un algoritmo que busca entre los píxeles vecinos el menor valor, así el píxel seleccionado se vuelve el punto de origen y se repite el proceso anterior hasta llegar a un píxel de destino.

4.4. DISTANCIA EUCLIDIANA

La distancia euclidiana describe la relación de cada celda o píxel con un origen o un conjunto de orígenes, basándose en la distancia de la línea recta. Si el origen es un ráster, solo debe incluir los valores de las celdas de origen, y las otras celdas deben no deben incluir datos; si el origen es una capa vectorial de puntos, después de procesada se transformará en un ráster, este incluirá la distancia medida desde cada celda hasta el origen más cercano y las distancias se miden en línea recta en las unidades de proyección del ráster (Esri, s.f.).

4.5. SUPERPOSICIÓN PONDERADA (weighted overlay)

Inicialmente es necesario tener claras las variables que se van a analizar para realizar este algoritmo y tener un ráster por cada variable, a continuación, se asignan pesos a las diferentes variables con el objetivo de que la suma de estos sea 100%. Cada una de las variables debe tener diferentes categorías, las cuales deberán ser evaluadas por la mirada de un experto teniendo una escala previamente definida.

Como ráster de salida, se obtiene en cada uno de los píxeles un valor que depende de los procedimientos anteriormente señalados.

4.6. PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO

El proceso de análisis jerárquico es un método basado en la evaluación de diferentes criterios que permiten jerarquizar un proceso y su objetivo final consiste en optimizar la toma de decisiones gerenciales; se utiliza para derivar escalas de proporción tanto discretas como continuas.

Estas comparaciones pueden ser tomadas de medidas actuales o por escalas fundamentales las cuales reflejan la fuerza relativa de las preferencias o sentimientos. Esta metodología ha encontrado sus aplicaciones más amplias en la toma de decisiones multicriterio, la planificación y la asignación de recursos y en la resolución de conflictos (Saaty, 1987).

Para realizar este proceso es necesario que las personas encargadas de tomar las decisiones evalúen cada uno de los criterios tomados en cuenta y especifique su preferencia con respecto a

cada alternativa de la decisión para cada criterio; el resultado es una jerarquización que prioriza la preferencia del grupo de expertos para cada alternativa propuesta.

4.7. RUTA DE MENOR COSTO

En los últimos años, este modelo ha encontrado aplicación en campos como lo ambiental, las decisiones en ingeniería y el ordenamiento territorial. El objetivo de este modelo es descubrir la ruta con el menor costo desde el origen y hasta su destino. Cuando se habla de costo no solo se debe interpretar como costo económico, esto depende del enfoque que se le dé al estudio, pudiendo tratarse de rutas con mejores condiciones ambientales, rutas más viables desde el punto de vista de la construcción de algún proyecto, o rutas que afectarían menos el patrimonio arqueológico, entre otros ejemplos.

Para crear estas rutas, primero se deben utilizar otras herramientas de costos como lo son el costo de distancia y el vínculo de menor costo; es importante tener en cuenta que para que el patrón del ráster de salida no se vea alterado, se deberá utilizar la misma resolución o tamaño de pixel en todos los ráster de entrada.

4.6.1. Costo de distancia:

El costo de distancia es el modelo encargado de calcular el costo acumulado de la distancia desde su origen y por una superficie de costo; es similar a la distancia euclidiana, pero en vez de calcular la distancia actual de un pixel dado al resto de los pixeles, esta herramienta determina la distancia más corta acumulada, es decir, a cada celda se le asigna el costo acumulado de la celda de origen más cercana.

Como insumos, se utilizan el ráster generado en la superposición ponderada y el punto de origen; como resultado, se obtiene un ráster que se utilizará en el cálculo de la ruta de menor costo.

4.6.2. Vinculo de menor costo:

El vínculo de menor costo es un modelo encargado de definir cuál es el vecino o la dirección que tiene el menor valor de pixel en la ruta de menor costo acumulado hasta el siguiente pixel o el origen más cercano.

4.7. FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría es una técnica que permite estudiar zonas geográficas a partir de imágenes y diversos sensores, esto permite obtener imágenes (ortofotos) y modelos de elevación digital con diferentes niveles de resolución; esta información es confiable y arroja datos de objetos físicos y procesos ambientales en el tiempo.

En 1840, el científico Aimé Laussedat, conocido como el padre de la fotogrametría, propuso el uso de fotografías para topografía y elaboración de mapas, pero la tecnología de la época no era adecuada para cumplir con ese propósito. La fotogrametría práctica para aplicaciones geográficas comenzó en 1880 usando fotografías tomadas en tierra, y solo fue hasta principios de 1990 que las ortofotos fueron principalmente utilizadas como un sustituto de los mapas de líneas, pues estos últimos representaban inadecuadamente el paisaje.

El aumento de la demanda de las ortofotos fue generado por el mayor uso de los sistemas de información geográfica, los usuarios de estos sistemas se dieron cuenta que los mapas convencionales eran inadecuados fondos para las operaciones SIG y que las ortofotos brindaban una mayor información que las hacía mucho más adecuadas para estos fines (Collier, 2020).

En la fotogrametría, la obtención de información se realiza a través de cámaras fotográficas, cámaras multispectrales o escáneres laser, combinados con sistemas de posicionamiento global GNSS.

Con las imágenes satelitales o imágenes capturadas mediante aviones, se puede abarcar una gran extensión pero con resoluciones limitadas, además, las condiciones atmosféricas como la nubosidad, pueden afectar los resultados; por el contrario, con fotografías obtenidas mediante sistemas autónomos no tripulados (drones), se pueden obtener altos grados de precisión puesto que al estar a bajas alturas, la nubosidad no es un problema, sin embargo, la cobertura es más limitada comparada con las otras técnicas mencionadas.

Con relación a las capturas obtenidas a través de drones y para que las mismas puedan ser procesadas, es necesario que exista un solape alto o una superposición alta entre las imágenes con las que se realizará la fotogrametría. La mayoría de los drones tienen sistema de posicionamiento de una sola frecuencia, por lo tanto, pueden tener errores de posicionamiento de varios metros, esto se puede corregir con drones que tengan un sistema RTK (Real Time Kinematic) enlazado con una estación en tierra o con puntos de control en tierra corregidos en postproceso.

La fotogrametría se desarrolla en 2 áreas: métrica e interpretativa. La fotogrametría métrica, como su nombre lo dice, consiste en hacer medidas precisas de la información de las fotos, esta permite conocer distancias, área, volúmenes, elevaciones, tamaños y sombras de los objetos; la aplicación más común de este tipo de fotogrametría es la producción planimétrica y topográfica de mapas a través de las fotografías obtenidas. La fotogrametría interpretativa, tiene como objetivo reconocer e identificar objetos e interpretar su significado a través de análisis cuidadosos y sistemáticos; esta está incluida en el campo de interpretación de imágenes y sensores remotos (Wolf, Dewitt, & Wilkinson, 2013).

4.8. ANTECEDENTES

A través de los años, el trabajo de diseño de trazados de líneas de transmisión se ha llevado a cabo con antiguos mapas, fotografías aéreas y múltiples visitas a campo, que aparte de tomar un gran periodo de tiempo, los resultados no siempre aseguran que la línea a construir sea sobre el trazado más óptimo disponible, lo que puede generar reprocesos, la posterior necesidad de rediseñar los proyectos y consecuentemente incurrir en retrasos.

La aplicación de metodologías SIG permite ahorrar tiempo y costos desde las etapas tempranas de los proyectos, posibilitando la identificación de las mejores rutas para las líneas de transmisión, determinando el trazado más simple y con el menor número posible de ángulos de desviación, pues los cambios de dirección requieren estructuras más robustas para soportar cargas adicionales (Rodolfo Mendes de Lima, 2016).

Para el diseño de una línea de transmisión, es necesario realizar un análisis de restricciones ambientales, reconociendo dichos factores como aquellos aspectos que, por sus características, imposibilitan la viabilidad ambiental de un proyecto sobre un área geográfica, como por ejemplo, las áreas protegidas a nivel nacional y las condiciones de extrema fragilidad del ambiente, entre otros. De igual forma, deben identificarse los factores de criticidad, como aquellas circunstancias que por sus particularidades dificultan en grados variables la implementación de un proyecto, por ejemplo, las condiciones de vulnerabilidad del ambiente; a partir de esta vulnerabilidad, se definen diferentes rangos de criticidad: muy baja, baja, medio, alta y muy alta (Peláez, 2010).

A través de los SIG podemos determinar los corredores de líneas de transmisión más adecuados, para ello, se puede utilizar la metodología de ruta de coste (least-cost-path) ya que permite encontrar las rutas más económicas (menores distancias) y más óptimas técnica y ambientalmente según los parámetros tomados en cuenta. Este proceso es llevado por un algoritmo el cual se encarga de buscar a partir de un punto de partida (pixel) el valor más bajo de los pixeles alrededor, este proceso se repite en cada pixel encontrado hasta llegar al punto de destino. La ruta de menor costo se puede obtener generando una superficie de costo acumulado (Douglas, 2006) y la superficie de costo puede calcularse considerando todos los criterios que afectan la ruta o trazado (David M. Atkinson, 2005); los criterios deben reflejar los objetivos que se quieren alcanzar para minimizar los impactos causados por el desarrollo del proyecto de infraestructura. (Stefano Bagli, 2010).

El análisis de ruta de menor costo es particularmente interesante para determinar trazados de líneas de transmisión, ya que es un proceso rápido y replicable que permite al usuario integrar información de diferentes fuentes.

5. METODOLOGÍA

Para la ejecución de este trabajo, se recopiló y procesó información primaria y secundaria acerca del área de estudio con el objetivo de analizar las posibles exclusiones y restricciones presentes en el territorio; a su vez, se implementaron diferentes herramientas de análisis espacial como lo fueron el análisis multicriterio y el modelo least cost path para definir las mejores alternativas de trazados de líneas de transmisión. Una vez definido el corredor, se realizó un modelo de fotogrametría con dron con el fin de obtener imágenes actualizadas del territorio, lo cual permitió ampliar el conocimiento del área de estudio y tomar decisiones de cara a la ejecución del proyecto.

5.1. TIPO DE TRABAJO

Este trabajo es una investigación aplicada, ya que, a partir de investigaciones, teorías y conocimientos adquiridos en la especialización, se buscó su aplicación para el progreso de un sector productivo, específicamente del sector de desarrollo de proyectos de infraestructura del sector eléctrico y sus líneas de transmisión de energía.

5.2. PROCEDIMIENTO

5.2.1. *Recolección de información secundaria.*

Para la elaboración de este estudio, se analizó el Plan Básico de Ordenamiento Territorial de la Dorada (Acuerdo 038 de 2013), del cual se tomó la información sobre amenazas naturales y zonas de interés ambiental.

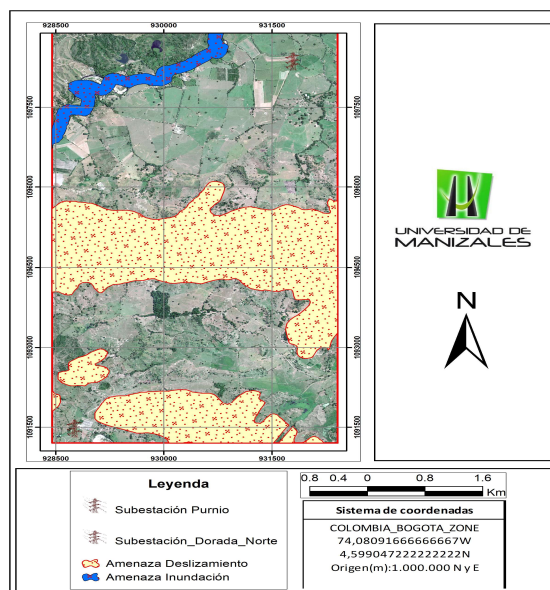


Figura 2. Amenazas Naturales

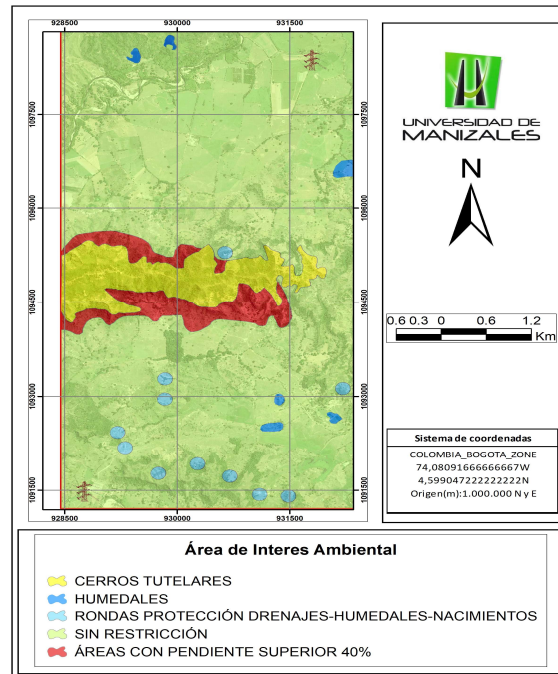


Figura 3. Áreas de Interés Ambiental

A su vez, se determinó la importancia del factor infraestructura (casas) presente en el área de interés; para ello, se decidió buscar información en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, sin embargo, la misma no está actualizada por lo que se realizó una digitalización manual con una capa vectorial de puntos como lo podemos ver en la siguiente imagen:

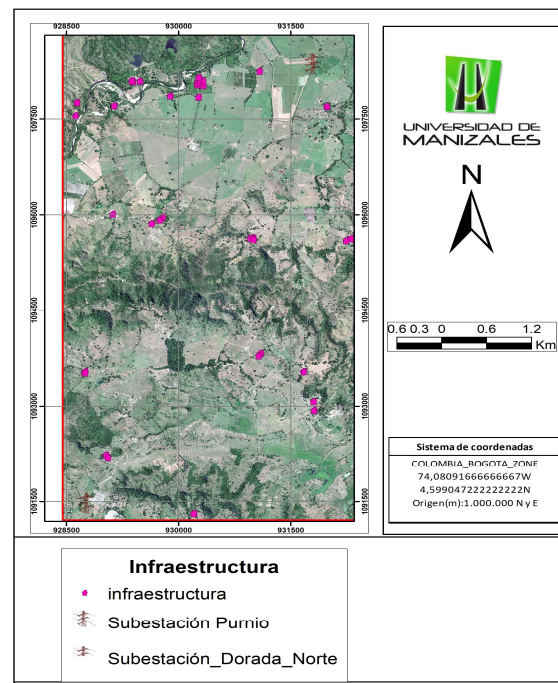


Figura 4. Infraestructura presente en el área de interés

Se realizó una consulta en el Sistema de Información Ambiental Colombiano, con el objetivo de conocer si en la zona de estudio existen zonas asociadas al Registro Único Nacional de Áreas Protegidas RUNAP, corroborando que en la zona de influencia del estudio no existen restricciones o zonas de protección.

5.2.2. Evaluación multicriterio

Se utilizaron 3 variables que son consideradas de especial importancia para la elaboración de este estudio: infraestructura, área de interés ambiental y amenazas naturales, las cuales serán descritas posteriormente. Para la asignación de los pesos de cada una de estas variables se utilizó la metodología de proceso de análisis jerárquico de Thomas L. Saaty y la calificación de la restricción se asignó según opinión de experto (ver tabla 1).

5.2.2.1. Infraestructura:

Es uno de los criterios importantes para el diseño del trazado de líneas de transmisión, el cual permite obtener información sobre las edificaciones presentes en el área de interés. Con relación a esta variable fue necesario realizar una digitalización manual, debido a la escasa información existente.

Una vez se obtuvo una capa vectorial de puntos con las edificaciones presentes, se utilizó la herramienta de distancia euclidiana para obtener una imagen con las distancias a partir de estos puntos de interés, luego se reclasificó la imagen para obtener una capa ráster, la cual muestra como restricción un buffer de 250 metros a partir del lugar donde están ubicadas las casas. A continuación, se observan los resultados obtenidos:

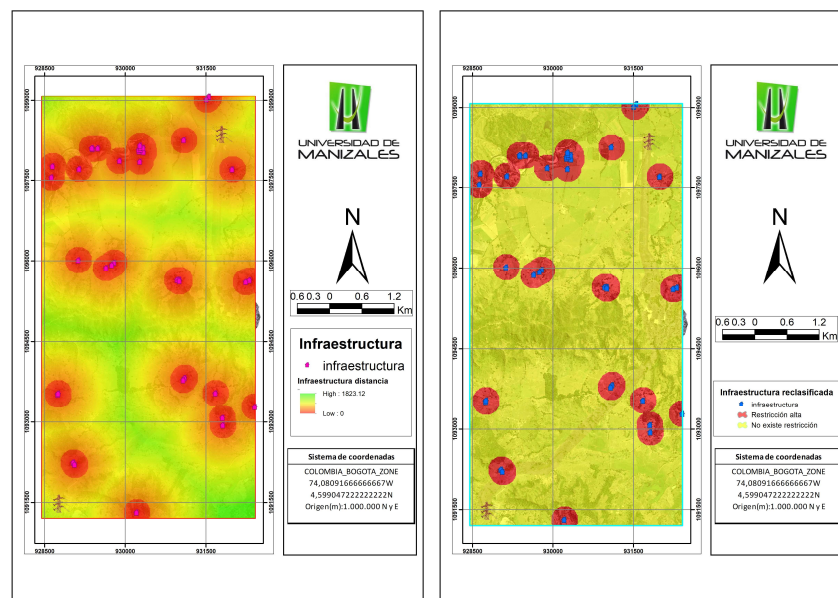


Figura 5. Distancia euclidiana y reclasificada de la capa infraestructura.

5.2.2.2. Área de interés ambiental:

Esta información evita contratiempos en el licenciamiento ambiental al momento de la ejecución del proyecto, ya que desde fases tempranas se deben tener en cuenta las restricciones ambientales a nivel municipal; para ello fue necesario la digitalización de planos del Plan Básico de Ordenamiento Territorial, ya que no fue posible conseguir versiones editables (ver figura 3).

Se evidenció que en el área de interés existen cerros tutelares, los cuales tienen vegetación nativa y están rodeados por pendientes superiores a 40°. A su vez, se encontraron nacimientos los cuales tienen restricciones de 100 metros a la redonda, por lo cual no sería posible colocar ninguna torre en esta zona, sin embargo, existe la posibilidad de atravesarlos aéreamente, eliminando así la restricción.

Se hallaron humedales los cuales tienen unas fajas de protección de 20 metros, pero al igual que los nacimientos, no se consideran restricción mientras no se coloque un apoyo dentro de la distancia anteriormente mencionada.

5.2.2.3. Amenazas naturales:

Esta información fue extraída del Plan Básico de Ordenamiento Territorial; se verificó que en el área de interés se encuentran: amenazas de tipo inundación las cuales son de gran importancia para el desarrollo del presente trabajo, y, amenazas por deslizamiento que no representan una restricción para el proyecto ya que la morfología del terreno presenta en su mayoría pendientes bajas y moderadas.

Tabla 1. Variables tenidas en cuenta y determinación de pesos

PESO	RESTRICCIÓN	PARAMETROS A EVALUAR	CALIFICACIÓN RESTRICCIÓN	OBSERVACIONES
21%	Infraestructura	distancia menor a 250 metros	5	Se califico con la restricción más alta ya que se consideró que no es viable que las líneas pasen a menos de 250 metros de una vivienda.
		distancia mayor a 250 metros	1	No existen restricciones a más de 250 metros de una vivienda.
11%	Amenazas naturales	Amenazas por deslizamiento	1	No representa una restricción para la ejecución del proyecto.
		Amenazas por inundación	5	Se considera una restricción importante
		Sin Amenazas	1	No hay amenazas presentes
68%	Áreas de interés ambiental	Humedales	1	No representan restricción para el proyecto mientras no se instale una torre dentro del humedal o su faja de protección de 20 metros.

	Áreas con pendiente superior al 40%	5	restricción alta para la ejecución del proyecto
	Cerros Tutelares	5	Restricción alta ya que los accesos a estos lugares son complicados.
	Rondas protección de drenajes-humedales-nacimientos.	1	No representa restricción mientras no se instale una torre en la faja de protección de 100 metros.
	Sin restricciones	1	no existen restricciones.

Se evidenciaron humedales los cuales tienen unas fajas de protección de 20 metros, pero al igual que los nacimientos no se consideran restricción mientras no se coloque un apoyo dentro de la distancia mencionada.

Este proceso de análisis multicriterio se llevó a cabo en ArcGIS como se observa en la siguiente figura.

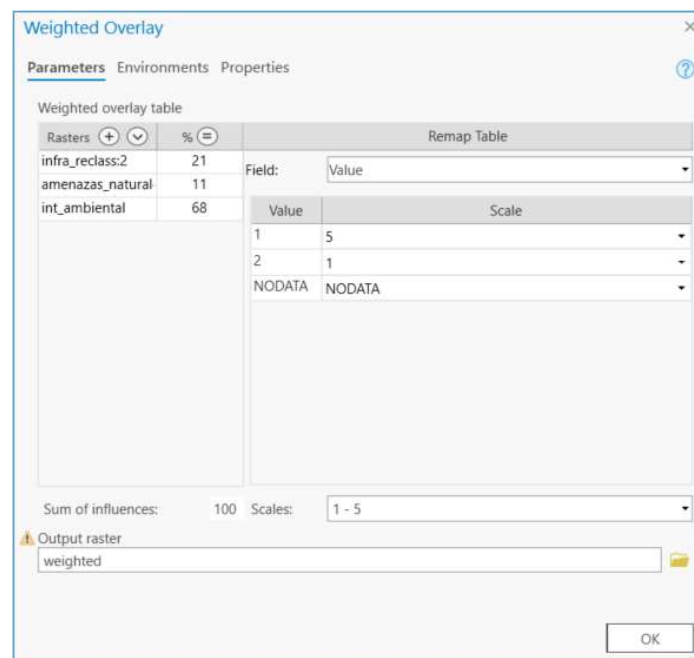


Figura 6. Ejecución análisis multicriterio en ArcGIS

Como resultado se obtuvo el siguiente ráster en el cual se puede ver el valor de los píxeles diferenciado por colores:

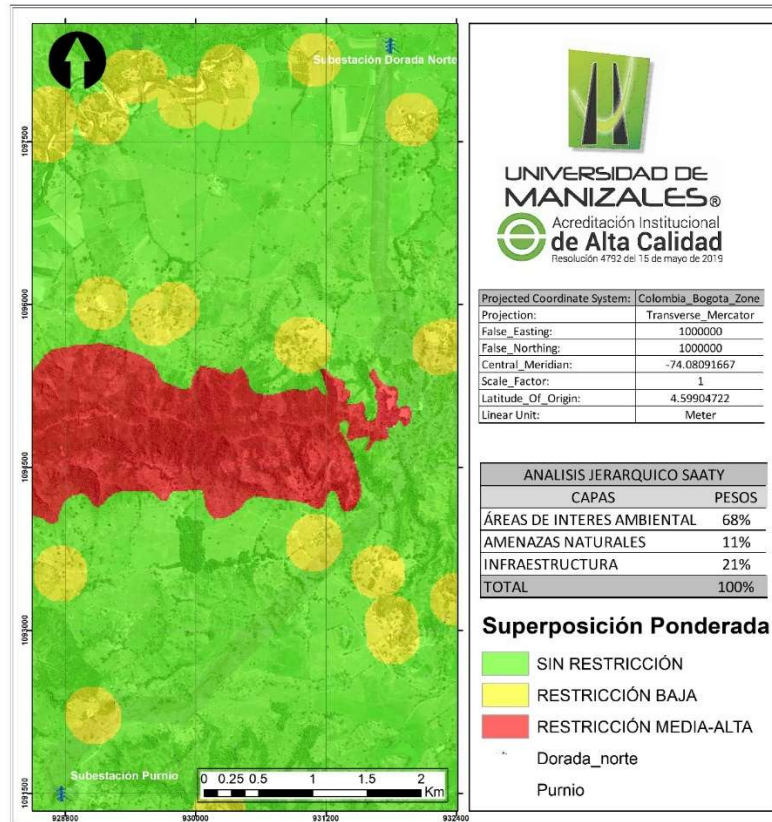


Figura 7. Superposición ponderada de las diferentes variables utilizadas

5.2.3. Ruta de menor costo

Se utilizó este algoritmo, el cual está basado en la definición de costo de superficie, que es una imagen ráster en la cual a cada pixel se le asignan valores, estos representan el costo de pasar a través de ellos. No siempre este costo es económico, en este estudio se refiere a la ruta óptima para construir una línea de transmisión teniendo en cuenta los siguientes parámetros: infraestructura existente, amenazas naturales y áreas de interés ambiental; es decir, los pixeles ubicados fuera de áreas de interés, de amenazas y lejos de casas, tendrán los valores más bajos. La ruta completa representa la sumatoria más baja de los pixeles entre dos puntos.

Para llevar a cabo este modelo, fue necesario ejecutar dos algoritmos necesarios como insumo para realizar el geoproceso final, estos fueron el costo de distancia y el vínculo de menor costo.

A continuación, pueden verse las salidas gráficas que arrojaron la ejecución de estos 2 algoritmos:

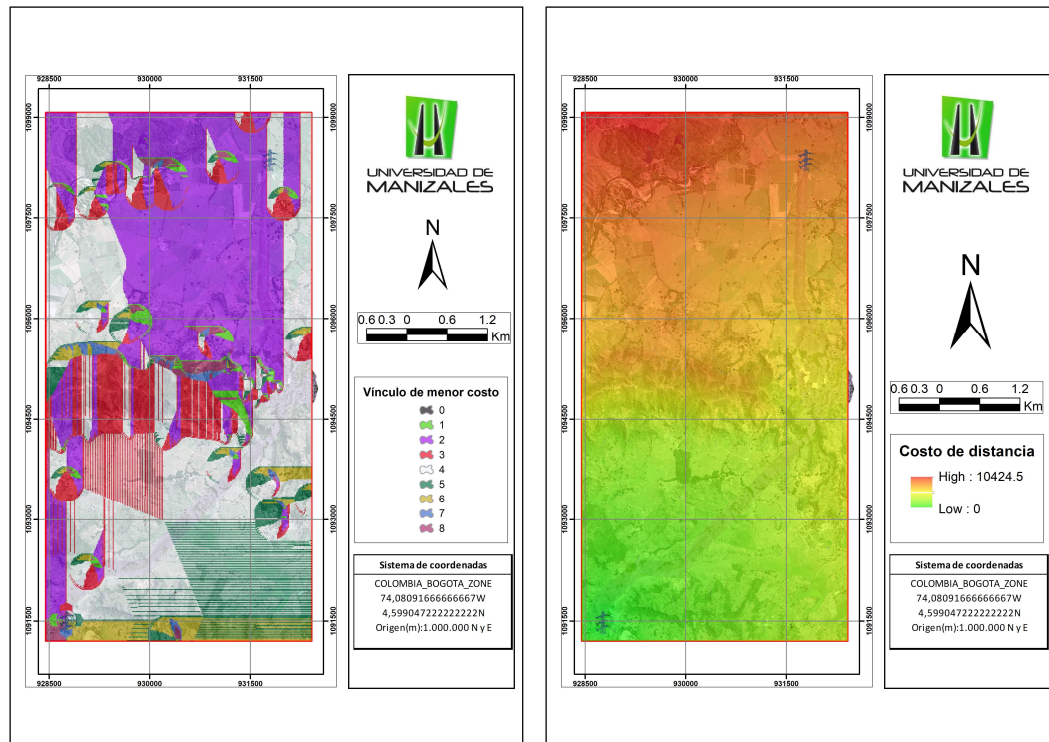


Figura 8. ejecución de los algoritmos de vinculo de menor costo y costo de distancia

5.2.4. Geoprocesamiento desarrollado en model buider

En la figura 9 se observan los geoprocesos que fueron necesarios para obtener el trazado de línea de transmisión óptimo.

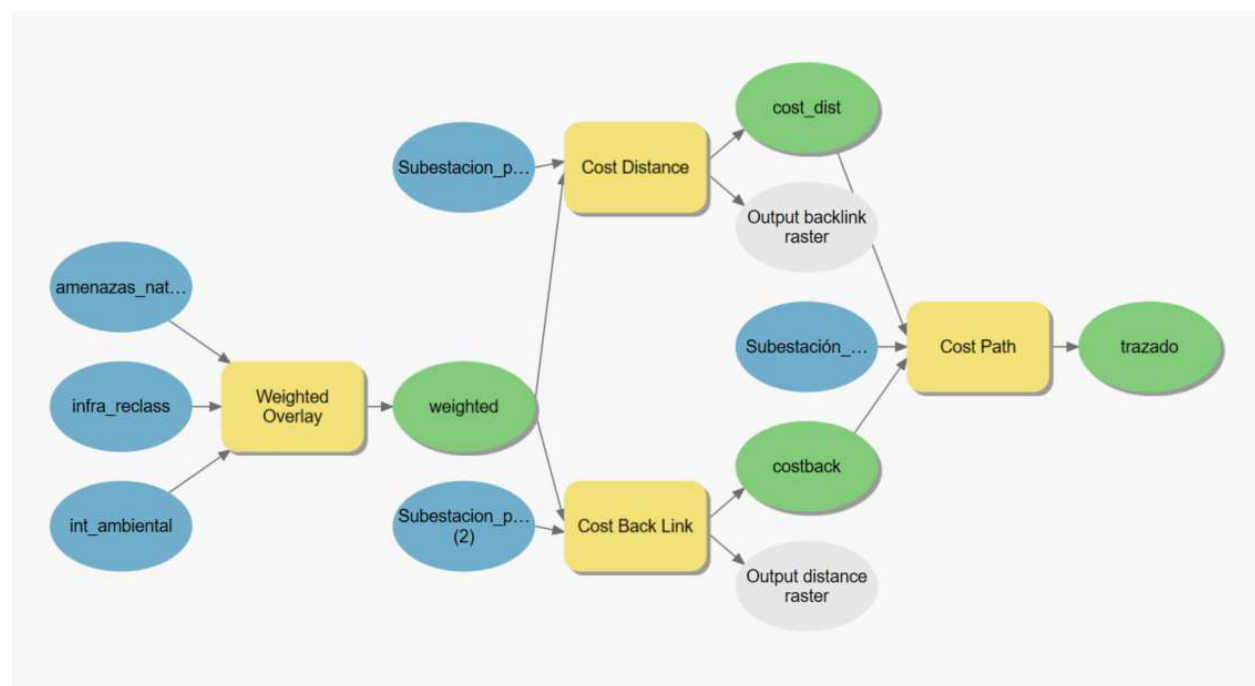


Figura 9. Proceso cálculo de mejor ruta para línea de transmisión

5.2.5. Fotogrametría.

Con el resultado del modelo, se procedió a su socialización con el área técnica de la CHEC para realizar los ajustes pertinentes; efectivamente en el área de estudio se encuentran varias líneas de transmisión de 115 kV y 220 kV, lo que representa una restricción considerable en el diseño final de los trazados, por lo cual se hicieron unos cambios menores en el modelo.

Una vez obtenido el diseño del trazado final, se tuvo una sesión de trabajo en campo en la cual se realizó una fotogrametría con dron y el resultado fue procesado con el software pix4d.

Para llevar a cabo este proceso, se siguieron los siguientes pasos: alineamiento de las fotografías, creación de nube de puntos, creación de malla y por último, la obtención de un ortomosaico y un modelo digital de terreno.

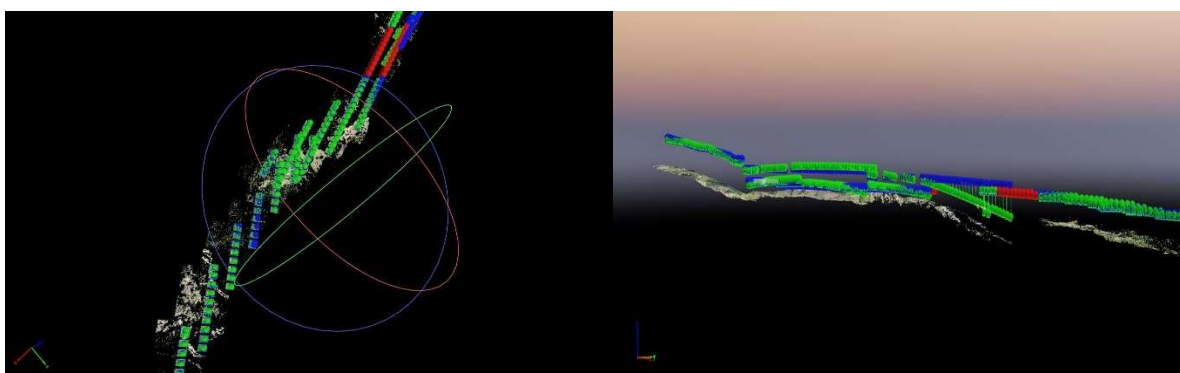


Figura 10. Alineación de las fotografías aéreas.

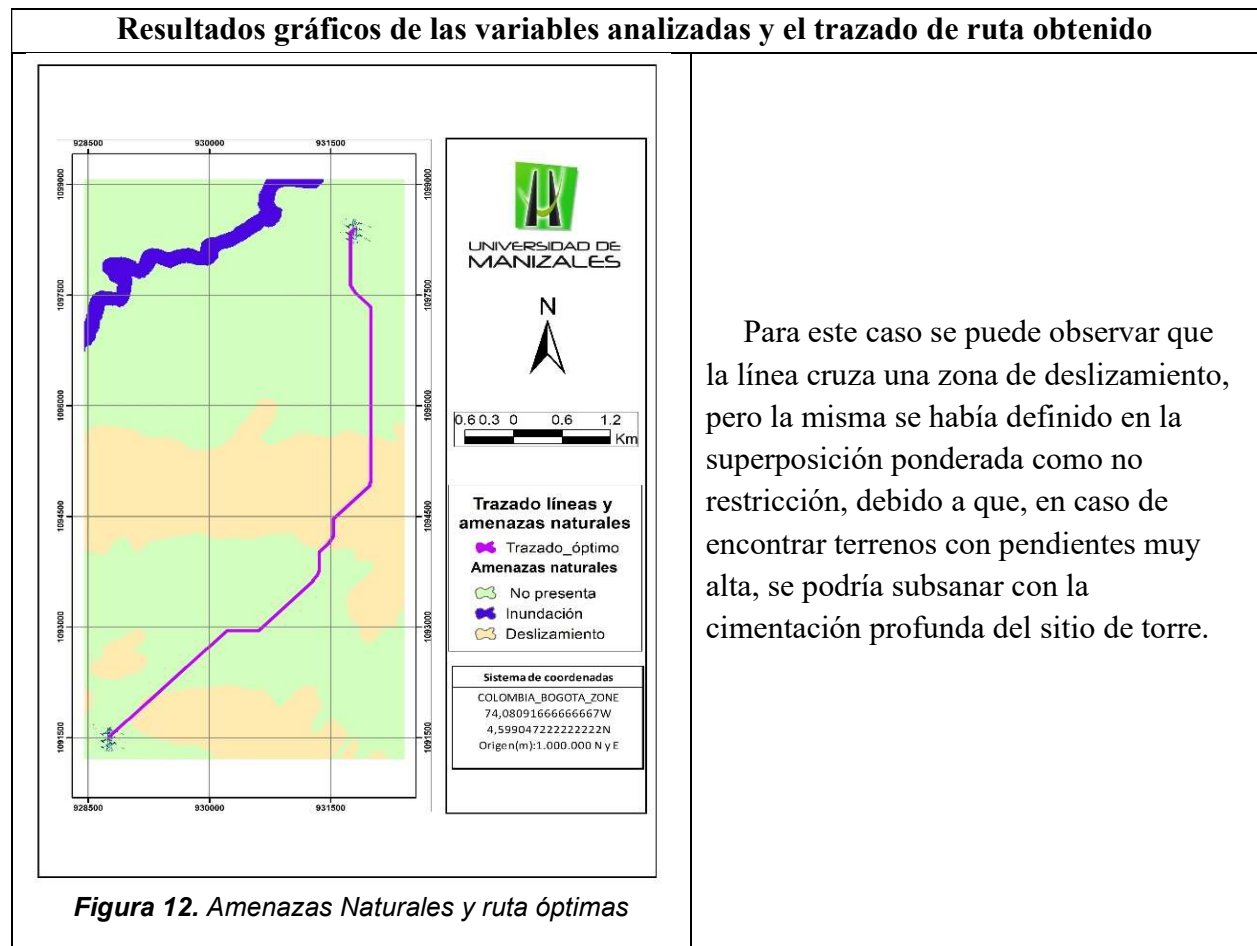


Figura 11. creación de nube de puntos

6. RESULTADOS

Como resultado, se obtuvo una metodología que cumplió con el objetivo general del modelo, el cual era obtener un trazado de ruta socio-ambiental óptimo, y por medio de fotogrametría, extraer insumos que permitan ver el estado actual de la zona de interés mediante una ortofoto y un modelo digital de terreno que facilite la elaboración del diseño de líneas desde las fases tempranas de formulación del proyecto.

Como resultado de la aplicación del modelo de la ruta de menor costo, se obtuvo un trazado que cumplió con las expectativas planteadas desde la superposición ponderada, ya que la línea de transmisión evitó las zonas que fueron seleccionadas como críticas, como se evidencia en las siguientes figuras:



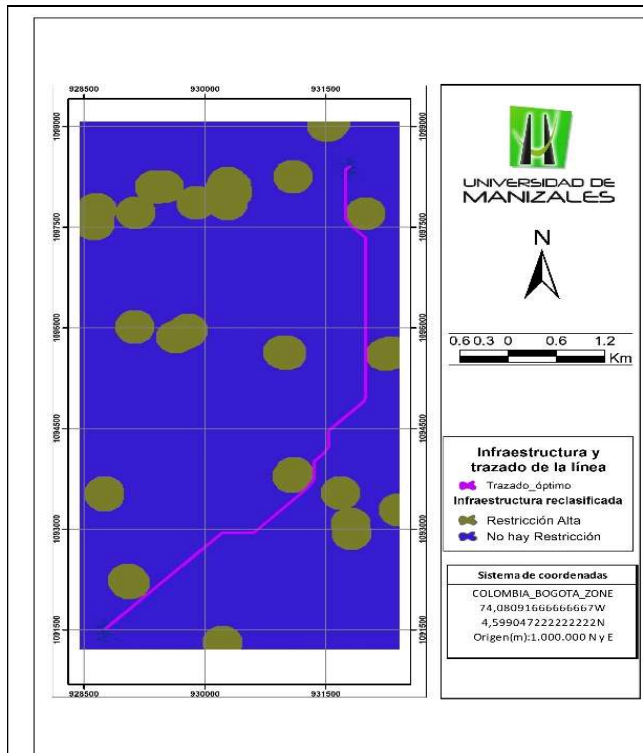


Figura 13. Infraestructura y ruta óptima

En la imagen se observa como la línea evita entrar al buffer de la infraestructura, la cual fue definida anteriormente como una restricción alta.

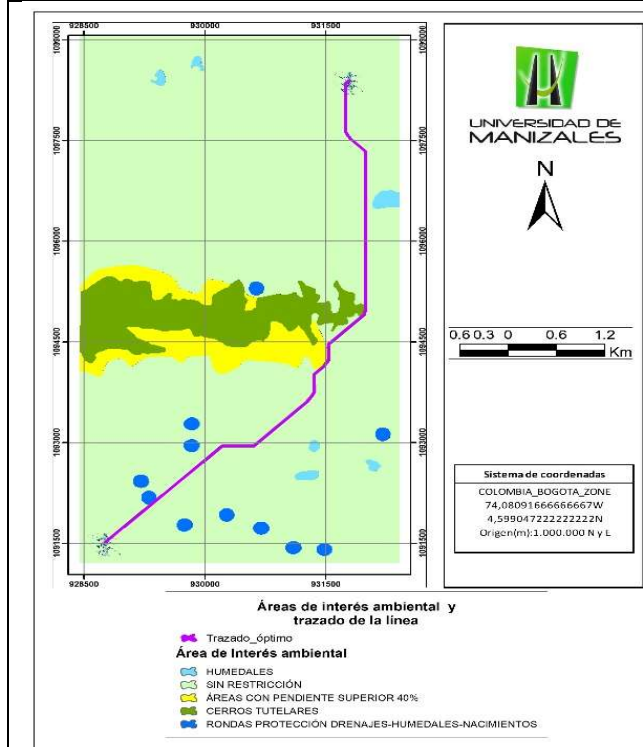


Figura 14. Áreas de interés ambiental y ruta óptima

En la imagen podemos observar como el trazado de la línea obtenido, evita los cerros tutelares y los terrenos con pendientes mayores a 40°, los cuales fueron declarados en la superposición ponderada como zonas de restricción alta.

Después de generar el trazado óptimo y socializar con la parte técnica eléctrica para mirar si era necesario realizar cambios debido a que en la zona cruzan varias líneas de 230 kV y 115 kV, se requirió efectuar algunos ajustes en el trazado final de la línea, ya que esta variable de cruces con líneas existentes, no fue incluida en el modelo; en la siguiente figura podemos observar los cambios realizados.

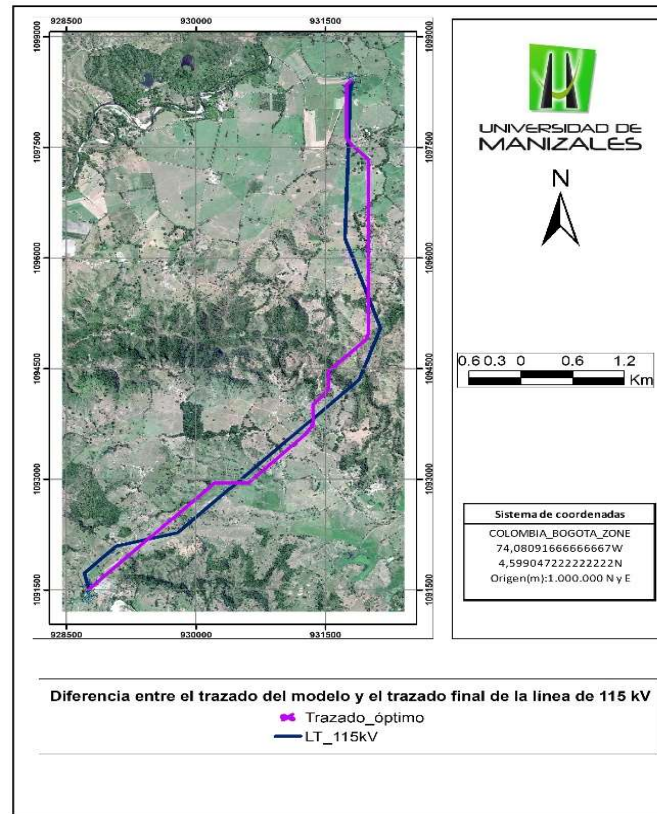


Figura 15. Ruta generada por el modelo vs ruta modificada

Con el modelo final, se procedió a realizar una fotogrametría con dron con el objetivo de crear un ortomosaico que permitiera obtener una imagen con una buena resolución que facilite la recolección de datos como un estimativo del aprovechamiento forestal que es uno de los ítems más importantes a tener en cuenta para elaborar presupuestos para el proyecto, ya que una de las actividades que necesita más inyección de recursos es la compensación forestal. Con este insumo, también se puede comprobar que no haya cambios como infraestructura nueva o proyectos aledaños en ejecución con respecto a la imagen de Google que no suele estar actualizada.

A su vez, es posible obtener un modelo de elevación de terreno, que sirve para llevar a cabo el plantillado de la línea (Localización de sitios de torre) en esta fase temprana de formulación de proyectos.

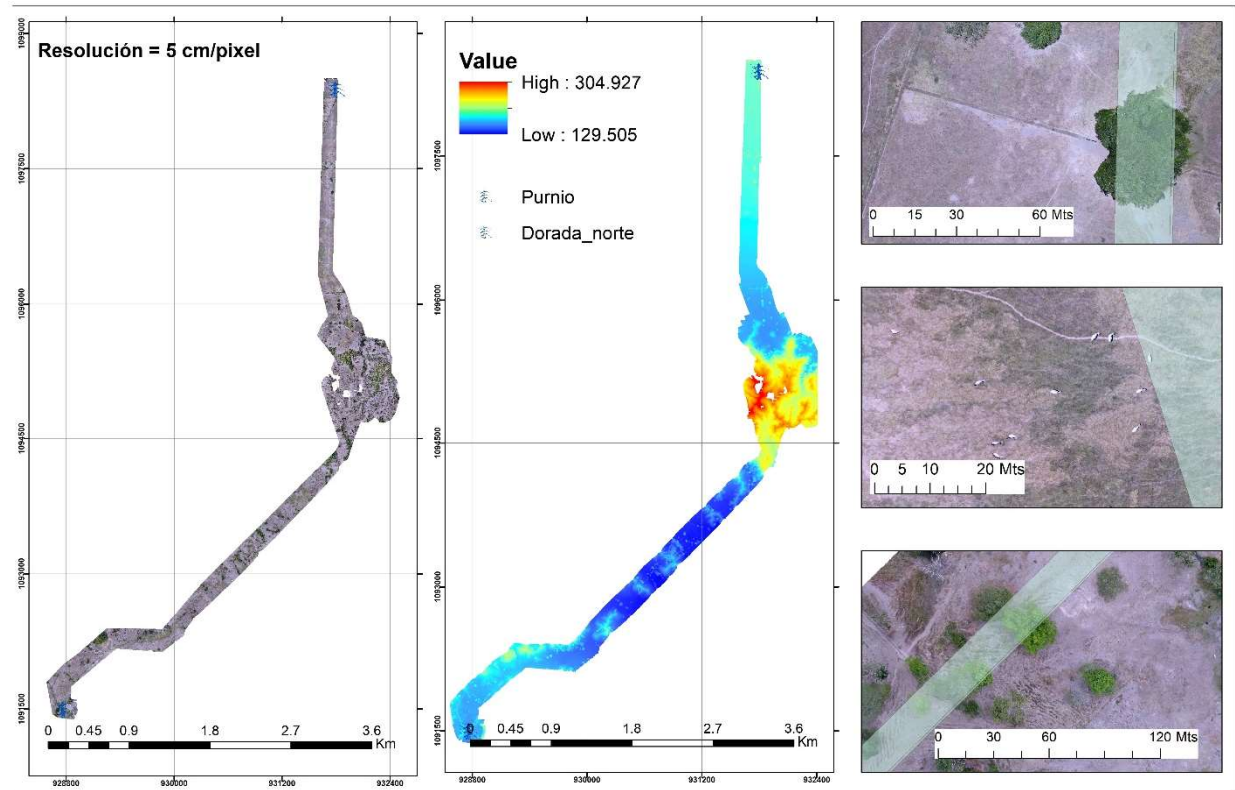


Figura 16. Resultado fotogrametría.

7. CONCLUSIONES

- Utilizando la metodología podemos minimizar las afectaciones sobre ecosistemas importantes, reduciendo los impactos ambientales, facilitando los trámites ante las respectivas autoridades y disminuyendo los costos de las compensaciones por pérdida de biodiversidad.
- La implementación de la tecnología SIG en los proyectos de infraestructura son una herramienta fundamental para la optimización del tiempo y los recursos.
- En términos sociales la metodología nos ayuda a tomar las mejores decisiones, facilitando así el relacionamiento con los grupos de interés, convirtiéndolos en un aliado estratégico para el desarrollo de los proyectos.
- La metodología nos permite obtener a bajo costo, una visión aproximada de la topografía con un nivel de detalle muy bueno; causando que la calidad de los estudios de un proyecto en etapa de factibilidad sea acertados, facilitando etapas posteriores como planeación de la ejecución.
- La inclusión de la fotogrametría con drones permite obtener una ortofoto que ayuda a adquirir una visión actualizada del territorio a impactar, facilitando la consecución de información importante como usos del suelo y nueva infraestructura existente.
- La ortofoto obtenida, permite hacer una aproximación mediante análisis SIG al aprovechamiento forestal necesario y a la compensación que esto conlleva, siendo esta última uno de los rubros con más peso en la gestión ambiental.
- La revisión cartográfica de información secundaria, permite identificar posibles zonas para el establecimiento de las compensaciones en etapas iniciales de un proyecto, lo que facilita la determinación de alertas tempranas para la ejecución de este requisito.

8. RECOMENDACIONES

- Debido a que la clasificación o evaluación de los parámetros utilizados en el análisis multicriterio es una opinión de experto, se considera conveniente realizar el proceso de análisis jerárquico con más de una persona (grupo de expertos) para evitar sesgos en los resultados.
- Se recomienda integrar a la elaboración del modelo fotogramétrico, puntos de control en tierra o tecnología RTK con el fin de mejorar los resultados en la precisión del mismo.
- Se recomienda la utilización de tecnología LiDAR con el objetivo de obtener datos de presión con respecto al aprovechamiento forestal y cruces con otras líneas de transmisión presentes en el territorio, por medio de una clasificación de nubes de puntos.
- Para la implementación de fotogrametría con dron para proyectos lineales que requieren muestreo de muchos kilómetros, se recomienda la utilización de la tecnología Ala fija (fixed wing), ya que la misma es mucho más eficiente con respecto a la autonomía.
- Se deberá implementar puntos de control o tecnología RTK para la elaboración del modelo fotogramétrico, con el fin de mejorar la precisión del mismo. Si bien el modelo comparado con las imágenes de Google fue muy acertado, si hubo unos metros de desviación como era predecible.
- El modelo sin puntos de control es adecuado para una etapa de ingeniería básica como la factibilidad, para una ingeniería de detalle será necesario la ejecución de una topografía convencional, o una fotogrametría ajustada con puntos de control o tecnología RTK.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Bosque Sendra, J., & Garcia, R. C. (2010). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 49-67.
- Collier, P. (2020). Photogrammetry and aerial photography. *International encyclopedia of human geography*, 91-98.
- David M. Atkinson, P. D. (2005). Multi-criteria evaluation and least cost path analysis for an arctic all-weather road. *Applied Geography*, 287-307.
- Douglas, D. H. (1994). Least-cost Path in GIS Using an Accumulated Cost Surface and Slope lines. *The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 37-51.
- Douglas, D. H. (2006). Least-cost Path in GIS Using an Accumulated Cost Surface and Slope lines. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 37-51.
- Esri. (s.f.). Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm>
- Peláez, G. L. (2010). Análisis de restricciones ambientales de la interconexión eléctrica Colombia - Panamá. tramo Colombiano. . *CIER*, 10-20.
- Presidente de la República de Colombia. (26 de Mayo de 2015). *Función Pública*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Rodolfo Mendes de Lima, R. O. (2016). Least-cost path analysis and multi-criteria assessment for routing electricity transmission lines. *IET Journals*, 1-9.
- Saaty, R. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 161-176.
- Stefano Bagli, D. G. (2010). Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, 234-239.
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2013). Elements of photogrammetry with applications in GIS. McGraw-Hill .