



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ENRUTAMIENTO ÓPTIMO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO
CRITERIOS SOCIO-AMBIENTALES Y TÉCNICOS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN ELÉCTRICA

LUIS MIGUEL RAMÍREZ CÁCERES

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO MORENO VIEYRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
BRUNO FÂNZERES DOS SANTOS
PATRICIO MENDOZA ARAYA
PABLO MEDINA COFRÉ (INVITADO)

Este trabajo ha sido financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico
y Tecnológico (Fondecyt) mediante el proyecto N.º 1181928.

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO
DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCION ELÉCTRICA
POR: LUIS MIGUEL RAMÍREZ CÁCERES
FECHA: 2022
PROFESOR GUÍA: RODRIGO MORENO VIEYRA

ENRUTAMIENTO ÓPTIMO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO CRITERIOS SOCIOAMBIENTALES Y TÉCNICOS

La expansión de los sistemas eléctricos es fundamental para satisfacer las crecientes demandas energéticas. Sin embargo, para construir una línea de transmisión existe una amplia variedad de decisiones y obstáculos. En este contexto, se propone utilizar los Sistemas de Información Geográfica (GIS) para identificar datos espaciales asociados a criterios socio-ambientales (parques nacionales, zonas urbanas y culturales), técnicos (topografía, quiebre angular de ruta), que luego se incorporan dentro de los algoritmos de optimización (e.g., Dijkstra) para encontrar rutas óptimas. Además, en este trabajo se introduce una metodología para generar distintas alternativas óptimas de rutas, estableciendo combinaciones entre los criterios, para destacar cierta importancia de cada uno de ellos respecto a las demás. Para ello, se utilizó una función multiobjetivo que contiene las ponderaciones asociadas a varios atributos de la línea y su ruta, incluyendo la irrupción en áreas prohibitivas. Nuestros hallazgos muestran que, al combinar distintos objetivos y ajustar restricciones de forma de reflejar distintos criterios en la toma de decisión, fueron generadas distintas alternativas racionales de rutas óptimas. Todas estas alternativas presentan beneficios desde el punto de vista de los tomadores de decisión racionales, y puede servir como un menú de opciones que luego puede ser analizado por una autoridad.

Agradecimientos

A Dios todopoderoso por su amor incondicional y por darme fuerzas en aquellos momentos de dificultad, permitiéndome continuar en este proceso académico y profesional a pesar de la distancia y el aislamiento social.

A mis padres y a mi hermano, por su amor, trabajo y sacrificio, pues me dieron aliento y me ayudaron a ser una mejor persona, ya que me motivaron de una u otra forma a cumplir todos mis sueños y metas.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al profesor Rodrigo Moreno, por guiarme durante toda la etapa de Tesis con su apoyo constante para poder culminar con éxito este objetivo propuesto.

Agradezco a los miembros de la comisión evaluadora, los profesores Bruno Fânzeres, Patricio Mendoza, y al profesor invitado Pablo Medina, por sus comentarios y correcciones en la etapa de desarrollo de esta Tesis.

Gracias a los amigos que volví a ver y mantener contacto en Chile, en especial a Danny y Alex. Además, expreso un agradecimiento a mis amigos compatriotas que conocí en tierras chilenas, en especial a Jorge, Alex, Ximena, Daniela, Ricardo; gracias por esos momentos de risas, por su apoyo, tiempo y amistad. A Pamela y Johanna, por brindarme su amistad y compañía sin importar la distancia en la que nos encontramos.

Y finalmente agradecer al programa Fondecyt mediante el proyecto N.º1181928, por el financiamiento para el desarrollo de esta Tesis.

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Hipótesis | 2 |
| 1.3. Objetivo general | 2 |
| 1.4. Objetivos específicos | 3 |
| 1.5. Contribuciones | 3 |
| 1.6. Estructura de la tesis | 3 |
| 2. Estado del arte | 4 |
| 2.1. Revisión de procedimientos internacionales para rutear | 4 |
| 2.2. Revisión de procedimiento de ruteo en Chile | 6 |
| 2.3. Revisión de modelos matemáticos para el enrutamiento de líneas de transmisión | 8 |
| 3. Metodología | 10 |
| 3.1. Proceso General | 12 |
| 3.1.1. Rasterización | 12 |
| 3.1.1.1. Criterios socio-ambientales | 13 |
| 3.1.1.2. Criterios técnicos | 15 |
| 3.1.2. Estructurar datos | 20 |
| 3.1.3. Adquirir rutas | 21 |
| 3.1.3.1. Problema de optimización | 21 |
| 3.1.4. Clusterización | 24 |
| 3.1.4.1. Elbow Method y k-means | 24 |
| 3.1.4.2. Criterios mínimo-promedio y mínimo-máximo | 26 |
| 3.1.5. Suavizar rutas | 27 |
| 3.1.5.1. Rapidly Exploring Random Trees | 29 |
| 4. Resultados y discusión | 31 |
| 4.1. Caso de estudio 1: Atacama - Coquimbo | 31 |
| 4.1.1. Datos de entrada | 31 |
| 4.1.2. Resultados | 32 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.1.3. | Discusión | 37 |
| 4.2. | Caso de estudio 2: Coquimbo | 37 |
| 4.2.1. | Datos de entrada | 37 |
| 4.2.2. | Resultados..... | 38 |
| 4.2.3. | Discusión | 39 |
| 4.3. | Caso de estudio 3: Copiapó..... | 41 |
| 4.3.1. | Datos de entrada | 41 |
| 4.3.2. | Resultados..... | 41 |
| 4.3.3. | Discusión | 43 |
| 5. | Conclusiones y trabajo futuro | 46 |
| 5.1. | Conclusiones | 46 |
| 5.2. | Trabajo futuro | 47 |
| | Bibliografía..... | 48 |
| | Anexos | 51 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1: Referencias sobre metodologías revisadas en estudio [12]. | 5 |
| Tabla 3.1: Ponderaciones de criterios socio-ambientales adoptados en el área de estudio. | 14 |
| Tabla 3.2: Comparación de una ruta desde el punto de vista de distintas funciones objetivo. a) Matriz de evaluación (ponderaciones). b) Criterios mínimo-promedio y mínimo- máximo. | 26 |
| Tabla 4.1: Matriz de evaluación de ponderaciones del caso de estudio 3, para la aplicación de criterios de selección mínimo-promedio y mínimo-máximo. | 43 |
| Tabla B.1: Matriz de evaluación del caso de estudio 1, para la aplicación de criterios de selección mínimo-promedio y mínimo-máximo. | 53 |
| Tabla B.2: Matriz de evaluación del caso de estudio 2, para la aplicación de criterios de selección mínimo-promedio y mínimo-máximo. | 55 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Flujo de etapas en metodología de Estudio de Franjas [13]. | 7 |
| Figura 3.1: Diagrama general de la propuesta metodológica. | 11 |
| Figura 3.2: Proceso general de rasterización. | 13 |
| Figura 3.3: Ángulo de elevación o depresión en la ruta guía. (a) Representación del ángulo de elevación entre pares de celdas vecinas. (b) Ráster de nivel de elevación. (c) Representación tridimensional del nivel de elevación y ejemplo de la ruta guía. | 16 |
| Figura 3.4: Ángulo de pendiente del terreno. (a) Representación del ángulo de pendiente de la celda central con su vecindad. (b) Promedio de la pendiente en el tramo de línea (i,j) | 17 |
| Figura 3.5: Ejemplificación pendiente del terreno. (a) Ráster de ángulos de pendiente del terreno. (b) Representación tridimensional del nivel de elevación y la ruta guía. | 18 |
| Figura 3.6: Perfil de alturas según criterios topográficos α y β . | 19 |
| Figura 3.7: Penalización de la pendiente del terreno. | 20 |
| Figura 3.8: Estructura de los datos del ráster. (a) Definición de la distancia entre celdas. (b) Enlaces entre los nodos de las celdas. | 21 |
| Figura 3.9: Proceso de clusterización general. (a) Conjunto de rutas de líneas de líneas de transmisión. (b) Imágenes binarias generadas para CNN. c) Aplicación del método del codo. d) Clusterización con k-means. (e) Clústeres resultantes. | 25 |
| Figura 3.10: Redimensionamiento de rásteres para el enrutamiento (a) Capa de criterios generales inicial. (b) Capa rasterizada a menor resolución, para adquirir la ruta guía. (c) Capa de mayor resolución, asociada a la rasterización de las celdas vecinas de la ruta guía. | 28 |
| Figura 3.11: Etapas del suavizado de rutas. (a) Ruta inicial. (b). Búfer de la ruta. (c) Ejecución del algoritmo RRT*. (d) Resultado de ruta suavizada. | 30 |
| Figura 4.1: Área de caso de estudio 1. | 32 |
| Figura 4.2: Set de rutas geoposicionadas del caso de estudio 1. (a) Set de rutas generadas. (b) Set de rutas clusterizadas. | 33 |
| Figura 4.3: Perfiles de altura del set de rutas clusterizadas del caso de estudio 1. | 33 |
| Figura 4.4: Etapas de los clústeres de rutas del caso de estudio 1. (a) Rutas iniciales. (b) Búfer de las rutas. (c) Rutas suavizadas. | 34 |
| Figura 4.5: Perfiles de altura del caso de estudio 1, rutas iniciales vs suavizadas. | 35 |
| Figura 4.6: Rutas finales del caso de estudio 1. (a) Mapa ráster de criterios socio-ambientales. (b) Mapa ráster de elevación del terreno, expresado en m.s.n.m. (c) Mapa ráster de pendiente del terreno, expresado en grados. | 36 |
| Figura 4.7: Perfiles de altura de rutas finales del caso de estudio 1. | 36 |
| Figura 4.8: Área del caso de estudio 2. | 38 |
| Figura 4.9: Rutas finales del caso de estudio 2 en el mapa ráster de criterios socio-ambientales. | 39 |
| Figura 4.10: Perfil de alturas del caso de estudio 2. | 39 |
| Figura 4.11: Rutas finales del caso de estudio 2. (a) Mapa ráster de elevación del terreno, expresado en m.s.n.m. (b) Mapa ráster de pendientes del terreno, expresado en grados. | 40 |
| Figura 4.12: Área del caso de estudio 3. | 41 |
| Figura 4.13: Rutas finales del caso de estudio 3 en el mapa ráster de criterios socio-ambientales. | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.14: Perfil de alturas del caso de estudio 3..... | 42 |
| Figura 4.15: Rutas finales del caso de estudio 3. (a) Mapa ráster de elevación del terreno, expresado en m.s.n.m. (b) Mapa ráster de pendientes del terreno, expresado en grados. | 44 |
| Figura B.1: Rutas finales del caso de estudio 1. (a) Mapa ráster de criterios socio-ambientales. (b) Mapa ráster de elevación del terreno, expresado en m.s.n.m. (c) Mapa ráster de pendiente del terreno, expresado en grados..... | 52 |
| Figura B.2: Perfiles de altura del set de rutas clusterizadas del caso de estudio 2..... | 53 |
| Figura B.3: Perfil de alturas del caso de estudio 2. | 54 |
| Figura B.4: Etapas de los clústeres de rutas del caso de estudio 2. (a) Rutas iniciales. (b) Búfer de las rutas. (c) Rutas suavizadas. | 54 |
| Figura B.5: Perfiles de altura del caso de estudio 2, rutas iniciales vs suavizadas..... | 55 |
| Figura B.6: Etapas de los clústeres de rutas del caso de estudio 3. (a) Rutas iniciales. (b) Búfer de las rutas. (c) Rutas suavizadas. | 56 |
| Figura B.7: Perfiles de altura del set de rutas clusterizadas del caso de estudio 3. | 56 |
| Figura B.8: Perfil de alturas del caso de estudio 3. | 57 |
| Figura B.9: Perfiles de altura del caso de estudio 3, rutas iniciales vs suavizadas..... | 57 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La energía eléctrica es una de las energías indispensables del mundo y es un componente esencial en la sociedad actual [1]. La energía eléctrica se produce a partir de fuentes de energía renovables o no renovables. Sin embargo, la mayor parte de la energía se genera a partir de centrales eléctricas convencionales que utilizan combustibles fósiles y nucleares, que probablemente se encuentran lejos de los centros de consumo debido a las limitaciones territoriales [2]. De modo similar, los sitios viables de energía renovable de gran escala generalmente se encuentran lejos de los centros de consumo de energía y la infraestructura existente del sistema eléctrico. Además de tales limitaciones de ubicación geográfica, las fuentes de energía renovables suelen ser granulares y dispersas [3]. En ese sentido, líneas de transmisión son el medio de transporte de energía eléctrica, y permite acercar las estaciones generadoras más lejanas hasta los centros de consumo[2].

En consecuencia, la expansión de los sistemas de transmisión eléctrica es fundamental para satisfacer las crecientes demandas de electricidad [4]. Es decir, las líneas de transmisión juegan un papel vital para el funcionamiento estable y exitoso del sistema eléctrico. Para solventar las necesidades energéticas, las nuevas adiciones de generación y de transmisión deben planificarse y ejecutarse simultáneamente, lo cual implica una gran cantidad de capital de inversión [2]. Teniendo en cuenta la enorme inversión de capital que supone el sector de la transmisión, las empresas de servicios públicos tienen como objetivo construir las líneas de transmisión con la menor inversión y obtener la máxima eficiencia económica [2].

Con el fin de satisfacer la creciente demanda mundial de energía eléctrica, la industria de la energía eléctrica se enfrenta al desafío de construir nuevas estaciones de generación y líneas de transmisión, así como actualizar y mejorar sus instalaciones existentes [2]. Sin embargo, la expansión del sistema de transmisión eléctrica se caracteriza generalmente por la complejidad técnica, la necesidad de considerar aspectos socioambientales y la necesidad de inversiones significativas [4]. Además, la evaluación de las nuevas líneas de transmisión es una tarea igual de compleja, la cual ha sido abordada mezclando los criterios de los expertos con un conjunto de datos espaciales limitados [5], [6]. Estos datos tienen actividades asociadas a la remoción o manejo de flora y fauna, intervención de zonas de valor paisajístico o turístico, afectación de comunidades o manifestaciones propias de cultura del pueblo, alteración de sitios con valor arqueológico, antropológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural [7].

En relación con lo anterior, para el enrutamiento de la línea de transmisión existen distintos métodos o algoritmos destinados a encontrar una solución óptima al problema de planificación de la transmisión [5], [8], [3], [9]. En general, estos métodos optimizan los costos de instalación y mantenimiento de las líneas de transmisión sujetos a criterios geográficos, ambientales, sociales y

legales [10], [11]. En este contexto, el enrutamiento puede ser definido como la etapa anterior al diseño de una nueva línea de transmisión de energía eléctrica, donde el planificador decide el camino y las áreas atravesadas por la línea teniendo en cuenta las limitaciones existentes [7], [11].

Tradicionalmente, los modelos que se desarrollan para la toma de decisiones son modelos de ubicación basados en el Sistema de Información Geográfica (GIS¹), que optimizan los parámetros técnicos y económicos de las líneas de transmisión mientras determinan el corredor de la ruta[10]. La construcción de líneas de transmisión implica enormes inversiones de capital que dependen de varios factores técnicos, geográficos, regulatorios y de otro tipo. Por lo tanto, existe un costo asociado que debe evaluarse acorde al uso de la tierra, accesibilidad, licencias socioambientales, infraestructura de la línea de transmisión. En ese sentido, el empleo de una trayectoria de línea de transmisión optimizada puede proporcionar un mayor ahorro en inversiones de capital [3], [7].

Considerando lo anterior, el proceso de toma de decisiones puede dar lugar a importantes oposiciones de las partes interesadas y retrasos posteriores en la fase de aprobación. Por lo tanto, para estudiar la expansión de los sistemas eléctricos en un intento de minimizar las externalidades asociadas con usos alternativos del suelo y objetos valiosos, se pueden utilizar los métodos de ruta de menor costo (LCP²) como base para los métodos que generan varias alternativas de ruta [10]. En ese sentido, es posible desarrollar herramientas que permitan generar la diversidad de rutas necesarias que ayuden a los tomadores de decisiones (inversionistas, comunidades indígenas, ambientalistas, propietarios de tierras, etc.) a seleccionar aquellos proyectos de transmisión, que presenten los impactos mínimos en los usos alternativos del terreno que son valiosos para la sociedad.

1.2. Hipótesis

Es posible generar alternativas óptimas de ruta para líneas de transmisión mediante una función multiobjetivo de ponderaciones que considere la combinación de los criterios socio-ambientales (parques nacionales, zonas urbanas y culturales, otras áreas protegidas) y los criterios técnicos (topografía, quiebre angular de ruta). Cada ruta es óptima desde el punto de vista de un tomador de decisión racional que tiene su propia ponderación de distintos objetivos.

1.3. Objetivo general

Generar distintas alternativas de rutas óptimas de líneas de transmisión mediante la combinación de distintos criterios socio-ambientales y técnicos que son utilizados en la toma de decisiones, para obtener un menú de opciones de ruta que luego puede ser analizado por una autoridad.

¹ Por sus siglas en inglés Geographic Information System

² Por sus siglas en inglés Least Cost Path

1.4. Objetivos específicos

- Caracterizar las principales capas de información GIS que describen los criterios socio-ambientales y técnicos del terreno.
- Determinar la influencia de los distintos criterios socio-ambientales y técnicos dentro del trazado de una ruta de línea de transmisión.
- Desarrollar un modelo matemático que considere la complejidad de los distintos criterios socio-ambientales y técnicos presentes dentro del terreno y los combine de forma racional dentro de las restricciones del problema de optimización.
- Evaluar el modelo matemático desarrollado en casos de estudio definidos dentro de la expansión de la transmisión.
- Identificar y clasificar las características de las distintas rutas generadas, que pueden ser potencialmente atractivas desde el punto de vista de las partes interesadas.

1.5. Contribuciones

- Establecer un conjunto de criterios territoriales presentes dentro del proyecto candidato que influyen en el trazado de líneas de transmisión.
- Desarrollar un nuevo modelo matemático que combine los distintos criterios sociales, ambientales, culturales, técnicos y económicos, existentes dentro del proyecto candidato.
- Demostrar de forma práctica que al resolverse el problema de optimización utilizando el modelo matemático para combinar los criterios, se generan diversas alternativas de rutas de línea.
- Ejemplificar casos de estudio que identifiquen características de las distintas alternativas de ruta de línea que puedan ser de potencial interés para los tomadores de decisión racionales.

1.6. Estructura de la tesis

El trabajo restante de esta tesis está organizado de la siguiente manera. En el Capítulo 2, se presentan los antecedentes teóricos de este trabajo; en el Capítulo 3 se describe la propuesta metodológica para el problema de optimización desarrollado para generar distintas alternativas de ruta para la línea de transmisión; en el Capítulo 4, se presentan los casos de estudio planteados, los resultados obtenidos y sus discusiones; finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las principales conclusiones de este trabajo y las propuestas de trabajo futuro.

Capítulo 2

Estado del arte

Con el fin de satisfacer la creciente demanda mundial de energía eléctrica, la industria de la energía eléctrica se enfrenta al desafío de construir nuevas estaciones de generación y líneas de transmisión (LT), así como actualizar y mejorar sus instalaciones existentes [2]. Sin embargo, la expansión del sistema de transmisión eléctrica se caracteriza generalmente por la complejidad técnica (como la pendiente y la geografía física del suelo), la necesidad de considerar obstáculos (como los factores sociales y ambientales asociados al uso del suelo) y la necesidad de inversiones significativas (derivados de los aspectos técnicos, regulatorios y del impacto del uso del suelo) [4], [2].

Para abordar el problema de planificación y expansión de la red de transmisión, existen distintos procedimientos internacionales que permiten identificar nuevas rutas de líneas de transmisión que pueden ser adoptadas acorde a los procedimientos y normativas gubernamentales. En esta sección se presenta una revisión de algunos de los procedimientos internacionales disponibles que consideran criterios medioambientales y técnicos; se presenta una revisión del procedimiento de ruteo aplicado en Chile; y los distintos modelos matemáticos utilizados en el enrutamiento de líneas de transmisión.

2.1. Revisión de procedimientos internacionales para rutear

El trazado de una línea de transmisión necesita ser evaluado en términos económicos, ambientales y sociales. Para minimizar los riesgos del proceso de emplazamiento, los cuales pueden generar sobreprecios o incluso inviabilidad del proyecto, es necesario determinar a priori los plazos de materialización de la obra, y considerar los aspectos relacionados con los requerimientos mínimos que la ley y reglamento establecen [12]. A nivel internacional, con el fin de minimizar los efectos de estos conflictos, los reguladores y los inversores en redes pueden aplicar metodologías avanzadas de emplazamiento y enrutamiento como EPRI [13], ERPA [14], OPTIPOL [15], National Grid [16].

En relación con lo anterior, en [12] se presenta una recopilación de aspectos importantes identificados para el diseño de la metodología de Estudio de Franjas (EdF³), los cuales fueron obtenidos a partir de una revisión de experiencias internacionales similares con algún grado de similitud con lo pretendido en la metodología de EdF presente en Chile. Para la obtención de estos aprendizajes, en [12] se utilizaron como referencia los países en distintos lugares del mundo, y se buscaron metodologías para el emplazamiento sistemático de líneas de transmisión.

³ Estudio de Franjas: Definido en el artículo 92° de la Ley 20.936 para el nuevo marco regulatorio para la transmisión eléctrica chilena, con el objetivo de determinar un conjunto de franjas preliminares asociadas a obras nuevas de transmisión seleccionadas.

Para cada una de estas metodologías, en [12] se presenta una revisión exhaustiva de la experiencia internacional con respecto a las prácticas usadas para determinar las franjas de las líneas de transmisión a ser construidas. De forma más específica, en [12] consideraron los siguientes denominadores comunes para la selección de metodologías; entre ellas de ser posible cada una de estas metodologías:

- Producir resultados similares a lo que la metodología EdF busca.
- Ser efectuado por una entidad gubernamental como lo hará la metodología de EdF.
- Ser originado por la necesidad de considerar aspectos sociales, ambientales y económicos en el emplazamiento de líneas de transmisión.
- Considerar instancias de participación ciudadana durante el proceso.
- Ser originado a partir de un proceso de discusión con partes interesadas.

En la tabla 2.1 se identifican las metodologías internacionales que presentan las consideraciones anteriormente indicadas, que podrían ser recomendados para el diseño de la metodología de EdF. Además, en [12] se indaga sobre la existencia de una metodología que pueda ser usada de referencia para ser adaptada al contexto chileno.

| Nombre de metodología o Entidad creadora | Referencias |
|---|---|
| EPRI-GTC (Estados Unidos) | (EPRI, 2006) |
| ERPA (Italia) | (Araneo, Celozzi, & Vergine, 2015), (Terna, n.d.) |
| EPE (Brasil) | (Matosinho, Furtado, Vieira, Serran, & Silva, 2010), (Mendes de Lima, Osis, de Queiroz, & Santos, 2016), (Ministério de Minas e Energia Empresa de Pesquisa Energética, 2005) |
| OPTIPOL (Noruega) | (Bevanger, Bartzke, Brseth, & Stokke, 2010) |
| National Grid (Gran Bretaña) | (National Grid, 2012) |
| BNetzA (Alemania) | (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen Abteilung Netzausbau, 2015), (Bundesnetzagentur, 2012) |
| UPME (Colombia) | (UPME, 2015) |
| SFOE (Suiza) | (SwissGrid, n.d.) |
| MINETUR (España) | (Ministerio de Industria, Energía y Turismo Gobierno de España, 2015) |
| Powerlink Queensland (Australia) | (Powerlink Queensland, 2012) |

Tabla 2.1: Referencias sobre metodologías revisadas en estudio [12].

La comparativa entre las distintas metodologías internacionales en relación a delimitación del área de estudio, datos de entrada, resolución de datos planimétricos, asignación de ponderaciones, áreas prohibidas, métricas de comparación de trazados, herramientas computacionales, instancias de participación en la definición de trazados, y otras caracterizaciones para el EdF; pueden ser encontradas en el documento de Estudio para la Implementación del Proceso de Determinación de Franjas Preliminares [12], por el Ministerio de Energía de Chile.

2.2. Revisión de procedimiento de ruteo en Chile

En Chile, el proceso de determinación de franjas para las líneas de transmisión dentro de la planificación de la transmisión se ha realizado tomando en consideración fines netamente económicos y/o de confiabilidad del sistema eléctrico, por ejemplo, los estudios y permisos ambientales se realizan después de que la autoridad de planificación haya ordenado las inversiones en la red [17]. En ese sentido, la planificación de las líneas de transmisión mandatadas por la Comisión Nacional de Energía (CNE) se realizaron con el único fin de mejorar la confiabilidad del sistema y disminuir la congestión de la red y, de esa forma, reducir los costos del sistema evitando desacoples. De esta manera, la CNE definía las líneas a ser construidas de manera general, dejando en manos de los privados la definición detallada del trazado y la negociación de las respectivas servidumbres con las contrapartes involucradas. En este sentido, y mirando toda la historia del sistema de transmisión eléctrica chileno, las expansiones de las líneas de transmisión no siguieron un patrón de ordenamiento territorial o de política ambiental integrado a los requerimientos de las autoridades eléctricas [12].

El marco de tiempo para la construcción de líneas de transmisión suele ser largo debido a muchos problemas regulatorios, y por los estudios de evaluación del impacto ambiental que deben llevarse a cabo con la participación de las principales partes interesadas para la justificación del proyecto [2]. Además, los estudios ambientales pueden cambiar la ubicación de la línea de transmisión, pero no la decisión de construirla. En ese sentido, para planificar el sistema de transmisión chileno de una manera sustentable, en el año 2016 fue publicada la ley 20.936 [17], la cual establece un nuevo marco regulatorio para la transmisión eléctrica y crea un organismo coordinador independiente del sistema nacional chileno [12].

La ley de transmisión establece, en su Artículo 92, que el Ministerio de Energía de Chile debe decidir si una nueva obra de transmisión necesita o no de un estudio (preliminar) de franjas el cual recomendará alternativas de franjas en base a criterios técnicos, económicos, sociales, culturales y ambientales. A partir de la información levantada en dicho estudio, el Ministerio de Energía recomendará una de estas alternativas de franjas de territorio para que sea aprobada por el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad [12], [18]. Por lo tanto, el Ministerio de Energía realiza Estudios de Franjas (EdF) para planificar las franjas de territorio en las que se construirán los principales proyectos de transmisión que el país necesita [18].

Los Estudios de Franja tienen dos objetivos principales, vinculados entre sí. Por una parte, dotar al necesario sistema de transmisión de una mirada de sostenibilidad ambiental que permita una intervención más estratégica en el territorio. Por otra parte, a través del diálogo temprano, dotar de aceptabilidad social a los trazados asociados a proyectos de transmisión, reduciendo riesgos e impactos en su ejecución [18].

En relación con lo mencionado anteriormente, en [12] se presenta una propuesta de metodología, en base a la revisión de las experiencias internacionales y el ejercicio de comparación, para la determinación de franjas de territorio para construir las líneas de transmisión. Dicha metodología está inspirada en la metodología utilizada por la EPRI-GTC [13] en Estados Unidos, pero incorpora importantes modificaciones que hacen su uso más adecuado para la situación de Chile, considerando, por ejemplo, el tipo de información pública que existe para realizar los análisis previos de emplazamiento de líneas de transmisión [12].

En la figura 2.1 se muestra la propuesta metodológica de [12] para realizar el EdF, la cual contempla 6 etapas. De estas 6 etapas, 4 son llevadas a cabo por el consultor que realiza el EdF propiamente tal y las otras 2 son desarrolladas por la Comisión Nacional de Energía y el Ministerio de Energía. Estas 6 etapas son enumeradas a continuación: (i) Determinación de los puntos a conectar; (ii) Determinación del Área Preliminar de Estudio de Franjas (APEF) alrededor de los puntos a conectar; (iii) Determinación del Área de Estudio de Franjas (AEF) dentro del APEF; (iv) Recolección y análisis de datos dentro del AEF; (v) Determinación de Corredores Alternativos (CA) dentro del AEF usando escenarios contrapuestos; y (vi) Determinación de Franjas Alternativas (FA) entendidas como los CA de mínimo costo determinados a través de la metodología. En el marco del desarrollo de la metodología se presenta una revisión detallada de los factores condicionantes para el emplazamiento de las líneas de transmisión, incluyendo los Objetos de Valoración (OdV) y Costos Tecno-económicos (CTE) como base para el desarrollo de factores condicionantes (y su uso para el EdF), y los aspectos técnico-económicos y de ingeniería como posibles factores condicionantes [12].

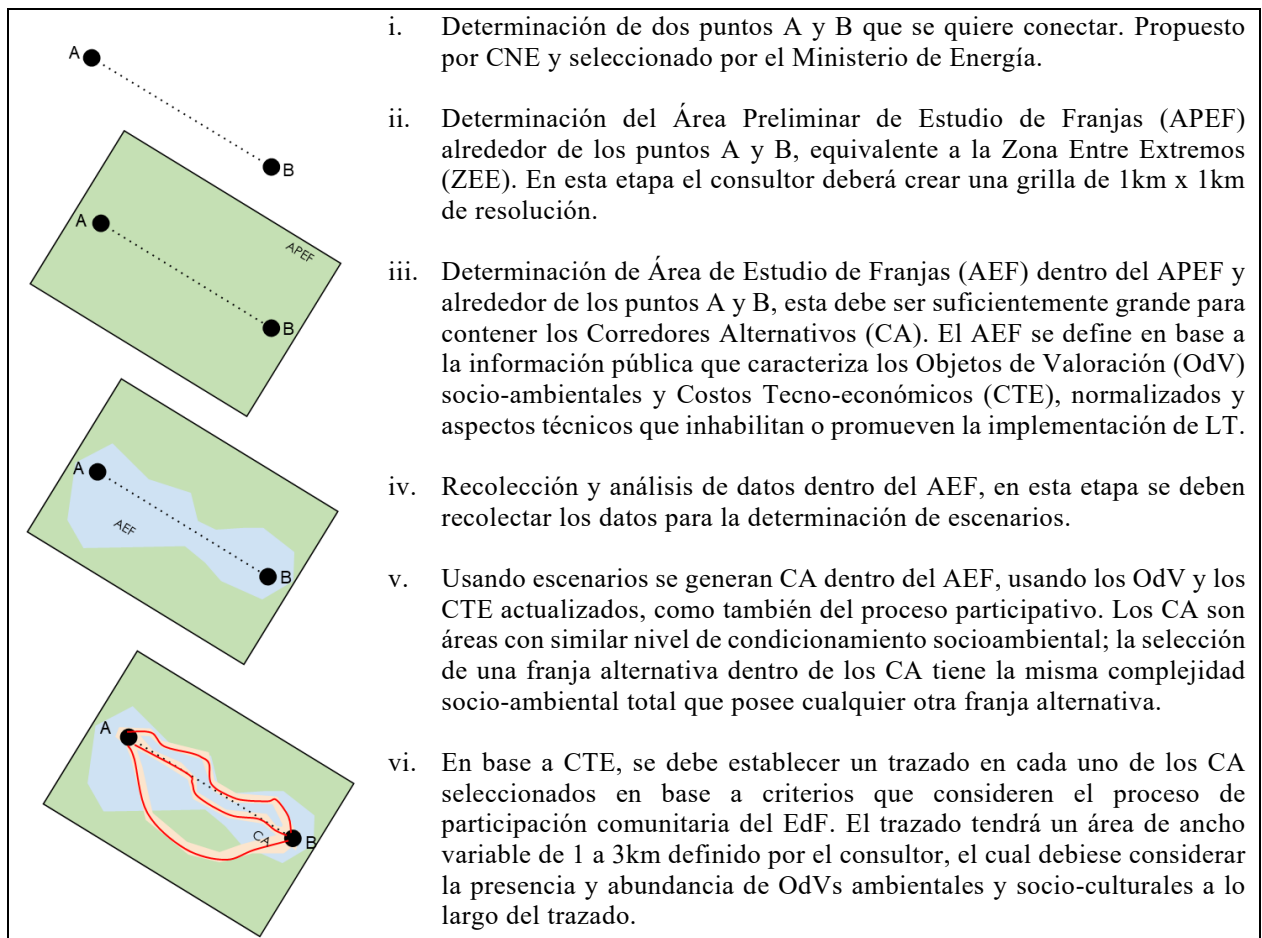


Figura 2.1: Flujo de etapas en metodología de Estudio de Franjas [12].

En [12] se complementa a detalle la metodología de EdF para las nuevas líneas de transmisión. El objetivo es promover una mirada más integral sobre la planificación y

expansión del sistema eléctrico chileno, al establecer y considerar criterios técnicos, económicos, sociales, culturales y ambientales.

2.3. Revisión de modelos matemáticos para el enrutamiento de líneas de transmisión

Para el enrutamiento de las líneas de transmisión, existen distintos métodos o modelos matemáticos desarrollados destinados a encontrar la solución óptima al problema de planificación de la transmisión. Con las capacidades informáticas y con la ayuda de GIS en la representación visual como una herramienta de apoyo a la decisión, es posible la integración de datos geográficos en la resolución de problemas en el enrutamiento de líneas de transmisión [10], [11]. En ese sentido, GIS considera los criterios (asociados a un costo de terreno, pendientes, obstáculos, infraestructuras, mantenimiento, etc.) que son aprovechados a través de distintos métodos computacionales que resuelven el problema de enrutamiento óptimo de líneas eléctricas [10].

En el proceso de enrutamiento, el camino se ve comprometido a desviarse para evitar terrenos costosos, obstáculos u otros criterios [11]. Por ejemplo, los autores de [1] proponen una metodología que ayuda a encontrar las posibles rutas dentro de una zona para nuevas líneas de transmisión, considerando criterios de observabilidad o visibilidad de sus torres; la variable utilizada como coste son las Horas de Observación Potencial Global (GPOH⁴), el cual corresponde al número de horas en promedio de un día en el que la cualquiera torre de una línea de transmisión puede ser vista por los observadores. Por otro lado, los autores de [6], [8] encuentran la mejor ruta al tomar en cuenta criterios como: pendiente, deslizamiento de tierra, cruce de carreteras, zonas de hielo, distancias a carreteras, parques nacionales, áreas arqueológicas, áreas residenciales, bosques y cruces de ríos.

En relación con lo anterior, los autores de [19] utilizan el sistema de localización de rayos (LLS⁵) para seleccionar la ruta de la línea de transmisión, y minimizar la cantidad de total de rayos, lo cual es significativamente beneficioso en la protección contra rayos al reducir la incidencia de descargas atmosféricas en las líneas de transmisión. En [20] se calcula la ruta más adecuada combinando múltiples criterios como costo, visibilidad, densidad de población y naturalidad del ecosistema. En [3], se propone un enfoque para el diseño de líneas de transmisión aéreas, considerando aspectos geográficos, de ingeniería y de costos en el proceso de toma de decisiones. Además, en [11] se tienen en cuenta los criterios ambientales junto con todos los costos de operación, mantenimiento e instalación de equipos, incluyendo un enfoque de los costos asociados a la pendiente del terreno.

Para encontrar el camino de ruta óptimo considerando aspectos relevantes, los autores de [5], utilizan el algoritmo de Q-learning de Inteligencia Artificial para determinar la mejor manera de enrutamiento; los criterios de enrutamiento son determinados los expertos, los cuales supervisan el aprendizaje en un ambiente de prueba y error dinámico. Por otro lado, en [6] para tomar las decisiones, se utilizan métodos de decisión multicriterio como el proceso de

⁴ Por sus siglas en inglés Global Potential Observation Hours

⁵ Por sus siglas en inglés Lightning Location System

jerarquía analítica (AHP⁶) y el proceso de jerarquía analítica difusa (FAHP⁷). En ese sentido, los autores utilizan AHP y el FAHP para ponderar los criterios relevantes para el enrutamiento de la LT. Para el problema de planificación de la red eléctrica, en [8] la planificación se transfiere a un problema de programación lineal entera mixta (MILP⁸), además se proponen restricciones mejoradas para el enrutamiento de líneas y la simplificación del modelo para mejorar la eficiencia computacional.

En [7] se presenta una metodología que adapta la técnica RRT*⁹ y la aplica en el problema del enrutamiento óptimo de las líneas de transmisión. Esta técnica es predominante para la planeación de movimientos de robots y tiene una fuerte analogía con el problema de enrutamiento óptimo de las líneas de transmisión. Además, esta técnica destaca en la eficiencia computacional, ya que reduce progresivamente el área a medida que va encontrando soluciones subóptimas. Sin embargo, la dificultad de implementar se basa en la necesidad de implementar una buena heurística (que subestime el costo óptimo) para este problema.

Para encontrar el camino más corto, en [11] se presenta un modelo de Programación Dinámica (DP¹⁰) para la optimización de rutas. Por otro lado, en [3] la ubicación de vértices toma como base la ruta obtenida mediante la aplicación del algoritmo de Dijkstra [21] para la construcción de un grafo que represente las conexiones posibles entre los puntos de la ruta, con el fin de reducir las distorsiones y obtener una representación realista; después, se utiliza DP para la decisión de la distribución óptima de las torres a lo largo del perfil topográfico de la ruta. Los autores de [1], [19], [20], [10] utilizan el algoritmo de Dijkstra para encontrar la trayectoria óptima de la línea de transmisión que contiene el mínimo costo asociado a un conjunto de criterios específicos dentro del área de estudio (corredores y no corredores). En ese sentido, el algoritmo de Dijkstra es uno de los algoritmos más comunes para obtener la ruta de camino más corto (LCP).

Para formar escenarios que permitan adquirir un conjunto de rutas de manera simultánea, los autores de [5], [8], [10], [11], [19] consideran multicriterios que al ser evaluados y ponderados en conjunto dentro de un ráster les permite encontrar el camino más corto para cada escenario. Además, en [20], los autores muestran que pequeños cambios en la ubicación de los puntos de inicio y final de la línea eléctrica pueden resultar en caminos significativamente diferentes y en niveles de impacto.

⁶ Por sus siglas en inglés Analytic Hierarchy Process

⁷ Por sus siglas en inglés Fuzzy Analytic Hierarchy Process

⁸ Por sus siglas en inglés Mixed-Integer Linear Programming

⁹ Por sus siglas en inglés (Optimal) Rapid Random Trees

¹⁰ Por sus siglas en inglés Dynamic Programming

Capítulo 3

Metodología

Nomenclatura

Set de Índices:

| | |
|---------------|--|
| \mathcal{E} | Set de tramos de línea de transmisión (i, j) |
| \mathcal{L} | Set de capas de criterios de evaluación k |
| \mathcal{N} | Set de nodos i |
| \mathcal{P} | Set de rutas p de líneas de transmisión |

Set de Parámetros:

| | |
|------------------|--|
| A_{ij} | Peso promedio del criterio socio-ambiental desde el nodo i al nodo j |
| B_i^{AMB} | Valor total del nodo i para el criterio socio-ambiental |
| $B_{i,k}$ | Valor ponderado del nodo i de la capa k |
| d_{ij} | Distancia del tramo de línea (i, j) |
| $f(\alpha_{ij})$ | Función cuadrática para penalización del ángulo de elevación del tramo de línea (i, j) |
| $f(\beta_{ij})$ | Función cuadrática para penalización del ángulo de pendiente del tramo de línea (i, j) |
| H^{ELV} | Término cuadrático para la penalización del ángulo de elevación |
| H^{SLP} | Término cuadrático para la penalización del ángulo de pendiente |
| I_k^{AMB} | Impacto de la capa k |
| J^{ELV} | Término lineal para la penalización del ángulo de elevación |
| J^{SLP} | Término lineal para la penalización del ángulo de pendiente |
| L^{ELV} | Término independiente para la penalización del ángulo de elevación |
| L^{SLP} | Término independiente para la penalización del ángulo de pendiente |
| Q^{AMB} | Multiplicador de criterio socio-ambiental |
| Q^{TEC} | Multiplicador de criterio técnico |
| R_{ij}^{ELV} | Ponderación del ángulo de inclinación o depresión desde el nodo i al nodo j |
| T_{ij}^{SLP} | Ponderación del ángulo de pendiente desde el nodo i al nodo j |
| W_{ij}^{AMB} | Ponderación asociada a criterio socio-ambiental desde el nodo i al nodo j |
| W_{ij}^{TEC} | Ponderación asociada a criterio técnico desde el nodo i al nodo j |
| w | Tamaño de píxel del ráster |
| α_{ij} | Ángulo de elevación o depresión del tramo de línea (i, j) |
| β_{ij} | Ángulo de pendiente del tramo de línea (i, j) |
| λ | Parámetro para combinación lineal entre criterios técnicos R y T |

Set de Variables:

| | |
|----------|---|
| x_{ij} | Variable binaria que indica si existe un tramo (i, j) (1) o no existe (0) |
|----------|---|

Visión General

En este capítulo se presenta una propuesta metodológica para generar alternativas de rutas de líneas de transmisión (LT), como se ilustra en la figura 3.1. Para abordar la propuesta metodológica, se presentan dos etapas macro. En primer lugar, se considera la información asociada a los criterios socio-ambientales (parques nacionales, zonas urbanas y culturales, otras áreas protegidas), y a los criterios técnicos (elevación y pendiente del terreno), representadas por medio de imágenes rasterizadas, con el propósito de penalizar el uso de la superficie del terreno en el mapa. En ese sentido, el área del terreno en estudio se proyecta en una imagen digital ráster, y los datos asociados a esta imagen (pixelada) están distribuidos de modo que componen una cuadrícula. Por lo tanto, la forma cuadriculada de la imagen permite generar una estructura mediante la conexión de enlaces entre cada uno de los centroides de los píxeles. Los enlaces ayudan a estimar la posible ruta de línea de transmisión, y estos contienen el valor de la penalización de los distintos criterios, lo cual es útil para estimar la complejidad de la línea de transmisión cuando ésta atraviesa el mapa para conectar los puntos de origen y destino dentro del área de estudio.

En segundo lugar, se utiliza un modelo matemático que utiliza la penalización de los mapas de criterios socio-ambientales y técnicos (topografía). Estos criterios son combinados al modificarse el nivel de importancia a través de parámetros incorporados dentro de una formulación matemática. El problema de optimización contiene las restricciones que describen a los criterios. Al resolverse problema de optimización se halla un LCP que es la solución al set de parámetro ingresados para reflejar la importancia de ciertos criterios. Por lo tanto, cada LCP representa a un problema optimización resuelto. En ese sentido, las restricciones están asociadas a un nivel relativo de importancia, lo cual caracteriza a que el conjunto de rutas adquiridas pueda ser distintas entre sí.

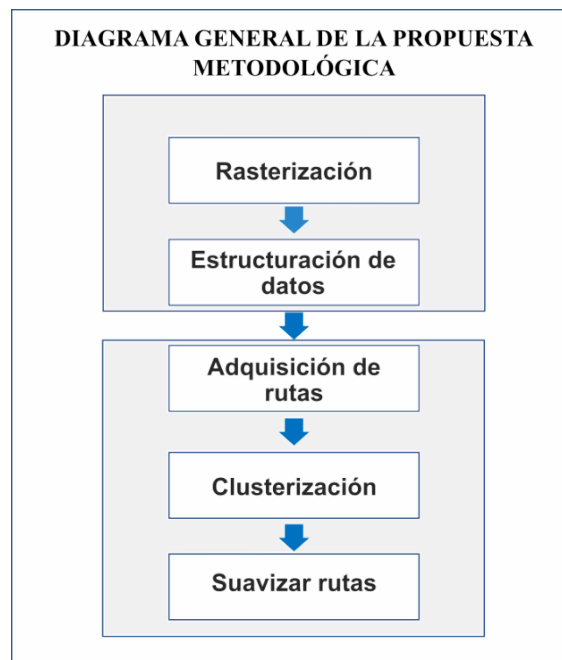


Figura 3.1: Diagrama general de la propuesta metodológica.

Con referencia a lo anterior, las rutas pueden ser clusterizadas a través de métodos de clasificación por su posición geográfica para obtener rutas que sean representativas, de esta manera se puede identificar la variedad de características entre los demás clústeres. Además, al identificarse las rutas de la línea de transmisión, cada ruta puede contener zigzag en su trayecto. En ese sentido, se considera otro criterio técnico asociado al zigzag (quiebre angular) de la ruta de línea, el cual consiste en suavizar el trazado mediante el uso de tramos rectilíneos para proporcionar una característica realista a la ubicación de los nodos de la ruta. Finalmente, la variedad de rutas resultantes puede permitir que alguna de ellas cumpla con los requerimientos solicitados por parte de los tomadores de decisiones.

3.1. Proceso General

3.1.1. Rasterización

A partir del uso alternativo del suelo, es posible definir zonas de interés que tienen alto impacto social y ambiental mediante imágenes (o polígonos) que contienen esta información geográfica. Estas zonas de interés pueden ser utilizadas (o no) para el posicionamiento de la línea de transmisión. En ese sentido, cada una de las externalidades asociadas al uso del suelo puede ser parte de una imagen compuesta, que es el resultado de superponer o combinar una encima de otra. Posteriormente, la imagen compuesta es rasterizada para formar una estructura de datos que asocie el valor ponderado del suelo y la ubicación geográfica del mismo.

Para el proceso de rasterización, es indispensable tener el Área de Estudio (AE) que la línea de transmisión (LT) puede ocupar. Los puntos extremos de la línea de transmisión se encuentran definidos a priori por la entidad planificadora, la cual establece los nuevos proyectos de expansión de la transmisión. Además, el AE es un área de tamaño significativo que permite la existencia de muchos corredores potenciales para identificar rutas alternativas que eviten complicaciones que surgen de la recolección de información a escala local [12]. El tamaño del AE utilizado en el presente trabajo está definido por un rectángulo cuyas dimensiones envuelven a los puntos extremos de la LT, considerando un margen de 3 a 5 km de los extremos.

El proceso de rasterización consiste en formar una matriz de celdas donde cada celda representa la unidad de área; esta tiene una dimensión específica y representa el uso alternativo del suelo que es valioso para la sociedad [10]. Los píxeles del ráster representan la ponderación de los criterios que dependen del uso alternativo que el terreno pueda tener, los cuales pueden limitar o favorecer el enrutamiento de la línea de transmisión en ciertas zonas. En ese sentido, en el presente trabajo la resolución espacial utilizada para los píxeles de los mapas rasterizados es de 50x50m. Reducir la resolución del mapa ráster provocará la pérdida de detalle y reducirá el tiempo de procesamiento. Sin embargo, para las etapas posteriores fue necesario reducir la resolución para establecer las posibles rutas previo establecer una alta resolución para recalcular las rutas definitivas.

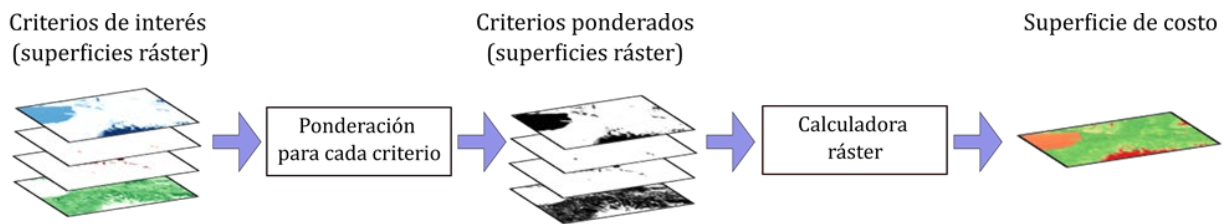


Figura 3.2: Proceso general de rasterización.

En referencia a lo anterior, con el AE definido, se procedió a recolectar los datos geográficos. Para este proceso, los datos geográficos generalmente son expresados mediante polígonos que representan los usos del suelo como parques nacionales, cuerpos acuáticos, zonas urbanizadas, zonas de patrimonio cultural, etc. Para manejar la información geográfica se utilizó QGIS 3.12.3 [22] para convertir el área de los polígonos en imágenes formato ráster. Además, el lenguaje de programación Python 3.8 [23] fue utilizado como motor de cálculo de las operaciones ráster a través de librerías especializadas. Para obtener un mapa ponderado total, los mapas se recopilaban, digitalizaban, recortaban o unificaban, y posteriormente se ingresaron los atributos de los criterios según las ponderaciones establecidas en la sección 3.3.1.1.

3.1.1.1. Criterios socio-ambientales

El primer paso es construir una superficie ponderada que represente la complejidad de implementación de la línea de transmisión sobre el AE. En ese sentido, esta superficie incluye cada criterio y lo asocia mediante ponderaciones, los cuales son seleccionados según las características sociales, ambientales y técnicas del AE a considerar en la construcción de la línea de transmisión las características geográficas del área de estudio [3].

Considerando lo anterior, los mapas de que contienen la información asociada a parques nacionales, zonas urbanizadas, cuerpos acuáticos, entre otras categorías, fueron obtenidas a través de plataformas de información como la Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE) de Chile [24], en conjunto con la información disponible en OpenStreetMap [25]. Adicionalmente, en [12] se presenta un listado de instituciones que disponen de bases de datos públicas chilenas que pueden ser fuente de información para generar nuevas capas ráster. Por ejemplo, se pueden asignar ponderaciones adicionales asociados a criterios de participación social con comunidades indígenas o sitios con significado cultural dentro de la zona local.

El manejo de materiales para la construcción de la línea de transmisión a través de las carreteras, es otro criterio importante para considerarse en el enrutamiento. En ese sentido, el trazado de las carreteras en el AE puede otorgar un grado de preferencia en el proceso de enrutamiento de la línea de transmisión debido al beneficio asociado con la accesibilidad a través de estos caminos existentes. En el presente trabajo, la distribución de las carreteras se obtuvo utilizando la información disponible en OpenStreetMap.

Ponderación de los criterios socio-ambientales

Las complejidades asociadas a cada criterio de interés dentro de la AE se estimaron en base a los datos de ponderación de la metodología de estudio de franjas para nuevas líneas de transmisión [12]. En base a lo anterior, las áreas prohibitivas tienen asociada una ponderación alta y representa áreas que se deben evitar, tales como, parques nacionales, áreas urbanas, zonas de interés cultural, cuerpos acuáticos de una zona determinada. En ese sentido, con el propósito de expresar el nivel de preferencia al paso de la LT, la información de cada mapa ráster fue transformada a una escala común, por ejemplo, desde 4 (más preferida) hasta 100 (prohibitivo), por lo tanto, estos rangos representan un bajo y alto impacto, respectivamente.

La tabla 3.1 muestra la ponderación de los distintos criterios de interés que se utilizaron en el presente trabajo. De la misma manera, se establecieron áreas búfer de distancia alrededor de cada criterio de interés para minimizar la afectación del paso de la ruta de la línea de transmisión a las cercanías de las áreas prohibitivas. Las ponderaciones relacionadas con cada criterio se estimaron en base a los datos de penalización de la metodología utilizada por EPRI-GTC [13] y por el Estudio para la Implementación del Proceso de Determinación de Franjas Preliminares [12].

Con referencia a lo anterior, luego de establecer la ponderación a cada capa ráster, se procedió a realizar la normalización de índices de los píxeles contenidos en cada capa perteneciente a un criterio. Las capas ráster normalizadas son almacenadas temporalmente para poder ser operadas de manera algebraica y combinar sus pesos superponiendo las capas. Después que las capas ráster fueron preparadas, la herramienta de calculadora ráster es utilizada para generar un solo mapa ráster con sus ponderaciones almacenadas dentro de una imagen expresada en formato (*.Tiff). En ese sentido, la capa ráster generada se utilizó posteriormente como uno de los datos de entrada para la solucionar el problema de optimización, además junto con los criterios técnicos, estos datos ayudaron a determinar los caminos de menor complejidad que definen las rutas alternativas.

| Ítem | Criterio | Ponderación |
|------|--|-------------|
| 1 | Parques Nacionales | 100 |
| 2 | Áreas oficiales de conservación excluyendo parques nacionales | 100 |
| 3 | Áreas de conservación privados y sitios prioritarios | 100 |
| 4 | Sitios de significación cultural y de manifestaciones o actividades culturales indígenas | 100 |
| 5 | Presencia de comunidades indígenas | 100 |
| 6 | Asentamientos humanos | 100 |
| 7 | Cuerpos acuáticos | 100 |
| 8 | Búfer de distancia hasta sitios de conservación o de interés | |
| 8.1 | Búfer entre 0 a 300 pies | 100 |
| 8.2 | Búfer entre 300 a 600 pies | 47 |
| 8.3 | Búfer entre 600 a 900 pies | 29 |
| 8.4 | Búfer entre 900 a 1200 pies | 15 |
| 9 | Campo abierto | 5 |
| 10 | Red de Carreteras | 4 |

Tabla 3.1: Ponderaciones de criterios socio-ambientales adoptados en el área de estudio.

3.1.1.2. Criterios técnicos

Los criterios técnicos analizados en la presente sección están asociados a la topografía del terreno (elevación y pendiente), cuyos datos de entrada fueron adquiridos mediante el uso de imágenes ráster. No obstante, existe otro criterio técnico asociado al quiebre angular de la ruta, que tiene como finalidad mitigar el zigzagado de la ruta de la línea de transmisión, el cual se analiza con más detalle en la sección 3.1.5.

Por lo que se refiere a los datos de entrada, el mapa topográfico de elevación se adquirió del proyecto EarthExplorer¹¹ [26] perteneciente al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS¹²) [27]. Los datos de elevación y pendiente se obtuvieron del modelo digital de elevación; estos datos fueron transformados a una resolución de 50 m. De esta manera, el ráster de elevación es considerado para ponderar los criterios técnicos, los cuales posteriormente fueron ingresados al problema de optimización de manera conjunta con los criterios socio-ambientales descritos en la sección 3.1.1.1.

Como se mencionó anteriormente, los criterios técnicos son establecidos en base a los datos de la topografía del terreno. Además, en términos muy simplistas, el construir en terrenos con pendiente se traduce en un menor espaciamiento entre estructuras lo que se traduce directamente en un mayor costo por kilómetro [12]. En ese sentido, en este trabajo se consideraron la elevación y la pendiente del terreno como criterios primordiales técnicos en la resolución del problema de enrutamiento de la LT. En ese propósito, se consideró dos criterios de interés en la resolución del problema de enrutamiento: (i) el ángulo de elevación del tramo de línea (i, j) ; (ii) el ángulo de la pendiente del terreno asociado a la vecindad, para el tramo de línea (i, j) .

La elevación del terreno en el trazado de ruta

Para presentar la relación entre la línea guía de ruta y las celdas la elevación del terreno es ponderada considerando las diferencias horizontales y verticales entre los centros de cada par de celdas del ráster [8]. En ese sentido, con el cambio de altitud entre tramos de línea que conectan pares de celdas, existe un valor asociado que cambia continuamente dando cuenta del cambio del nivel de elevación del terreno. Por otro lado, los valores o ponderaciones expresados de manera discreta mediante rangos definidos pueden resultar en la pérdida de oportunidad en la resolución del problema de enrutamiento, lo cual involucra resultados subóptimos o no concluyentes.

En el presente trabajo se utilizó el ángulo de elevación (o ángulo de depresión) entre pares de celdas vecinas dentro de la guía de ruta. Este ángulo fue considerado como uno de los aspectos prioritarios para resolver el problema de enrutamiento. Por lo tanto, el enrutamiento bajo este criterio resuelve el problema de optimización y encuentra el LCP al minimizar los cambios angulares (en función de la elevación) que incurre en penalizaciones intrínsecas. En ese mismo sentido, al evaluarse netamente este criterio, la ruta guía preferentemente evita los

¹¹ Herramienta de búsqueda, visualización y descarga de datos topográficos del USGS

¹² Por sus siglas en inglés United States Geological Survey

cambios de altura que puedan incrementar la ponderación total estimada de la LT, lo cual da como resultado tramos de ruta que se posicionan a un mismo nivel de elevación del terreno.

La figura 3.3a muestra el ángulo de elevación o depresión α_{ij} existente entre el tramo de línea (i, j) para cualquier par de celdas vecinas dentro del ráster de altitud del terreno. El ángulo α es calculado en base a la elevación del plano horizontal (celda de referencia), hasta la altura del plano horizontal de la celda vecina. Por lo tanto, el ángulo α_{ij} es calculado utilizando la distancia euclidiana y sus componentes entre un par de dos puntos distantes en el espacio.

La ecuación (3.1) contiene el cálculo de α_{ij} ; la componente vectorial asociada al plano xy que representa el tamaño de celda del ráster, es multiplicada por $\sqrt{2}$ para las transiciones diagonales hacia celdas vecinas o multiplicado por 1 para las transiciones verticales u horizontales dentro del plano xy . Las celdas están representadas por coordenadas cartesianas (x_i, y_i, z_i) , donde $i \in \mathcal{N}$. La variación de la elevación (dz) proporciona la componente complementaria para el cálculo del ángulo. En relación de lo anterior, el ángulo α_{ij} fue establecido como parámetro ponderado dentro de la resolución del problema de optimización, de esta manera se considera su valor absoluto para considerarla dentro de las condiciones técnicas del terreno.

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \text{abs} \left(\tan^{-1} \left(\frac{z_j - z_i}{y_j - y_i} \right) \right), & \text{si horizontal o vertical} \\ \text{abs} \left(\tan^{-1} \left(\frac{z_j - z_i}{\sqrt{2} \cdot (y_j - y_i)} \right) \right), & \text{si diagonal} \end{cases}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E}, i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N} \quad (3.1)$$

En la figura 3.3b y figura 3.3c se ilustra un ejemplo sencillo del nivel de elevación del terreno y su representación tridimensional, respectivamente. Al considerar la variación de altura dz entre un par de celdas vecinas cualquiera, el ángulo de elevación o depresión se asocia intrínsecamente a esta variación.

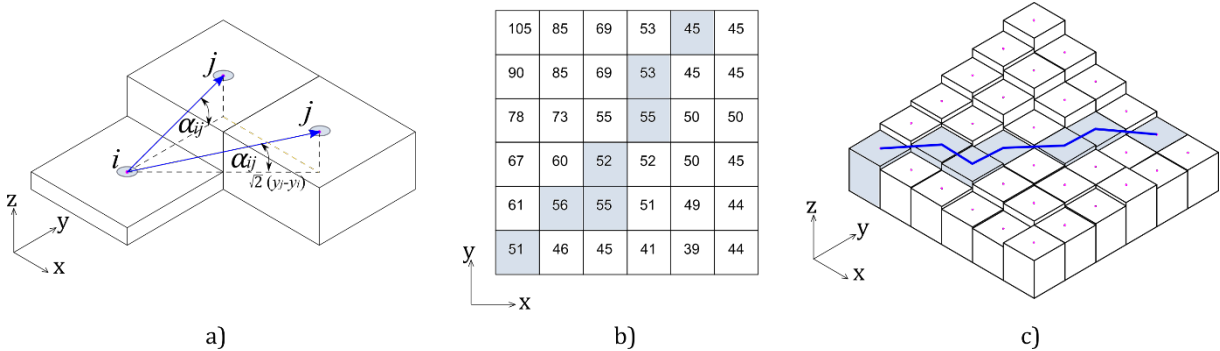


Figura 3.3: Ángulo de elevación o depresión en la ruta guía. (a) Representación del ángulo de elevación entre pares de celdas vecinas. (b) Ráster de nivel de elevación. (c) Representación tridimensional del nivel de elevación y ejemplo de la ruta guía.

En relación con lo anterior, la ruta puede posicionarse a un cierto nivel de altura; por ejemplo, en la mitad de la altura de ascenso de una montaña, probablemente bordeando, cumpliendo los criterios de optimalidad en su trazado para conectar sus puntos extremos de

línea de transmisión. De la misma manera, es posible considerar la pendiente del terreno dentro de la formulación del problema de optimización; lo que contribuye a mitigar de cierta manera el posicionamiento de las torres delinea de transmisión a la mitad de las pendientes considerables a lo largo de cadenas montañosas. Debido a que las pendientes elevadas pueden dificultar el acceso del material de construcción de la obra en esos tramos, pueden aumentar la complejidad del mismo. Para ilustrar esto, el perfil de alturas de la figura 3.3c se muestra en la figura 3.6, donde se contrastan las rutas obtenidas en base a los criterios netos de ángulo de elevación y de pendiente del terreno, respectivamente.

La pendiente del terreno en el trazado de ruta

La pendiente del terreno es un criterio importante para el problema de localización de torres, además, este criterio es considerado en conjunto con otros que asocian el tipo y altura de torres, clase geotécnica del suelo, tipo de fundición de las bases, tensiones mecánicas por deflexión angular; las aplicaciones de estos criterios son establecidas en [9], [28]. De esta manera, la pendiente tiene impacto con las decisiones asociadas a los criterios técnicos dentro de la solución del problema de optimización; por lo tanto, la pendiente es abordada dentro de los criterios técnicos junto con la altitud del terreno.

En relación con lo anterior, el ráster de la pendiente se obtuvo en base al procesamiento disponible en las herramientas de Python o de la herramienta QGIS. Con la imagen resultante del proceso, en cada celda se identifica el ángulo de inclinación de la superficie con respecto al plano horizontal. Por lo tanto, mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno. En ese sentido, la pendiente del terreno se ajusta a un plano formado por las nueve celdas locales para proporcionar un ajuste más natural al terreno en base a la vecindad de las celdas.

La figura 3.4a ilustra el ángulo β_i del plano del pendiente establecido en la celda central junto con las 8 celdas vecinas. El cálculo del plano se realiza utilizando una vecindad de celdas de 3x3 (ventana móvil); la pendiente se calcula como la tasa de cambio de la superficie en las direcciones horizontal (dz/dx) y vertical (dz/dy).

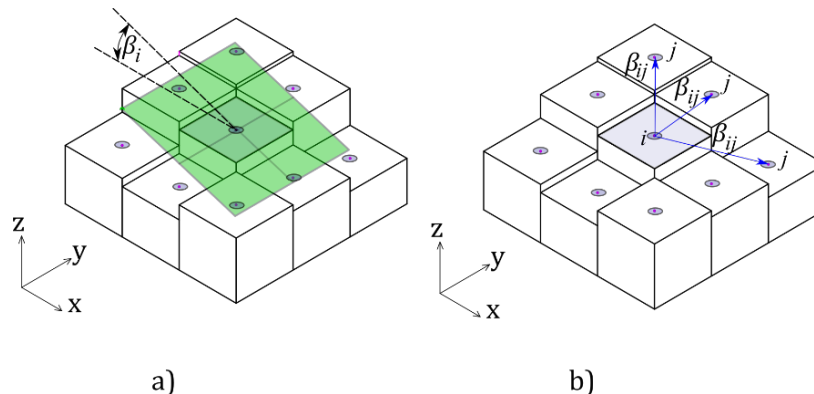


Figura 3.4: Ángulo de pendiente del terreno. (a) Representación del ángulo de pendiente de la celda central con su vecindad. (b) Promedio de la pendiente en el tramo de línea (i,j)

La ecuación (3.2) calcula el ángulo promedio de pendiente del tramo de línea (i, j) . En la figura 3.4b se ilustra el ángulo β_{ij} considerado en el enlace de un par de celdas vecinas. Por consiguiente, el ángulo β_{ij} se establece como parámetro a ser ponderado de acuerdo con las condiciones técnicas necesarias del terreno.

$$\beta_{ij} = \frac{\beta_i + \beta_j}{2}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E}, i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N} \quad (3.2)$$

En la figura 3.5a y figura 3.5b se ilustra la pendiente del terreno en cada celda y la representación tridimensional de altitud del terreno, respectivamente. De acuerdo con los datos planteados, se considera minimizar la suma de los ángulos de pendiente de las celdas por las cuales atraviesa la ruta de la LT. Como resultado de los datos, el camino más corto (línea azul) para llegar al destino es a través de las celdas que contienen el menor valor posible, es decir, la línea de transmisión se posiciona en áreas planas bajo este criterio; lo cual puede ser útil para elegir el tipo de torre de transmisión que sea de menor costo y facilitar el transporte y montaje de las estructuras.

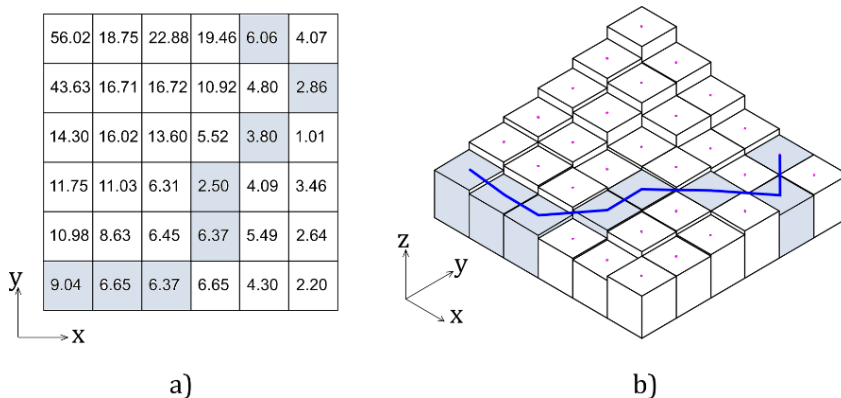


Figura 3.5: Ejemplificación pendiente del terreno. (a) Ráster de ángulos de pendiente del terreno. (b) Representación tridimensional del nivel de elevación y la ruta guía.

Los perfiles de alturas de las LCPs de las figura 3.3b y figura 3.5a, se muestran en la figura 3.6. Por lo tanto, las LCPs fueron obtenidas en base a los criterios de selección que asocian a los ángulos α y β . Con los datos obtenidos, el perfil azul está posicionado en una altura superior al perfil rojo, además no tiene cambios de altura bruscos. Por otro lado, el perfil rojo se posiciona a un nivel menor de altura en promedio y contiene cambios de altura mayores respecto al perfil azul debido a que su interés de optimización está en el ángulo de pendiente.

Con lo mencionado anteriormente, los dos parámetros evaluados dan como resultado dos rutas que se posicionan a distinto nivel de altura en promedio, y con distinta ubicación de las celdas del camino que las componen. En ese sentido, es posible realizar la combinación de estos dos parámetros para buscar un punto intermedio entre las bondades que ofrecen estos criterios, además alguna combinación de estas puede ser útil para los tomadores de decisiones.

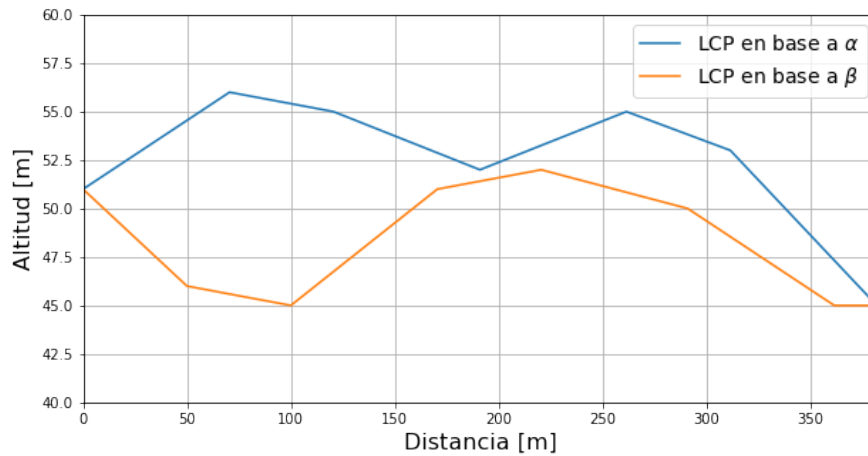


Figura 3.6: Perfil de alturas según criterios topográficos α y β .

Ponderación de la topografía

La ubicación de la línea de transmisión debe considerar la erosividad del suelo, es decir, el efecto erosivo de las lluvias definido por su intensidad, persistencia y frecuencia. En ese sentido, la erodabilidad es la que define la resistencia del suelo a ser erosionado, cualidad que está definida por la estabilidad de los agregados que lo componen [12]. De esta manera, una consideración de ingeniería importante para la ubicación de las torres de la línea de transmisión, es la pendiente del terreno.

Las pendientes por debajo de 10° son las más adecuadas para la construcción y el mantenimiento de una línea de transmisión aérea [12], [29]. Las pendientes en el intervalo de 10° hasta 17° representan una restricción moderada al aumentar los costos de construcción y tener una mayor probabilidad de erosión [12], [13]. Por lo tanto, las pendientes superiores al 17° deben evitarse, si es posible, debido a los altos costos de construcción y mantenimiento [3], [13].

Los costos de construcción en estas áreas son significativamente más altos debido a los requisitos de estabilización del suelo, las limitaciones de equipos y los permisos ambientales. Además, el terreno altamente inclinado puede limitar el acceso a las áreas y dar como resultado trabajos de construcción y mantenimiento que se realizan desde el aire [13].

En relación con lo anterior, en la figura 3.7 se estableció una curva de penalización en función de la pendiente del terreno. La penalización está basada en una función cuadrática y su objetivo es asignar una menor penalización a aquellos ángulos del tramo (i, j) por debajo de 10° que son adecuadas para la construcción. Por el contrario, los ángulos mayores reciben una mayor penalización que va creciendo de forma cuadrática, para otorgar una característica restrictiva dentro del problema de optimización para aquellos tramos de línea.

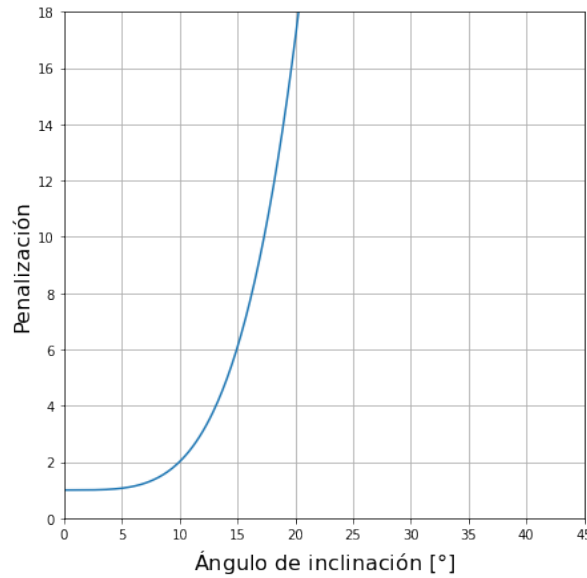


Figura 3.7: Penalización de la pendiente del terreno.

3.1.2. Estructurar datos

La estructura ráster GIS es básicamente una matriz regular de celdas cuadradas donde cada celda representa un área y una posición elemental. El detalle del análisis geoespacial depende del tamaño de la celda elemental (resolución). De esta manera, la matriz corresponde a una cobertura geográfica de la complejidad del terreno (pendiente del terreno, uso del suelo y otros aspectos), y la información contenida en cada elemento de la matriz corresponde a la información numérica asociada a la ubicación correspondiente (ponderación del uso del suelo, pendiente promedio que rodea la ubicación, etc.) [11].

Por lo tanto, la figura 3.8a muestra la estructura de la información dada por GIS, la cual es muy común en sistemas basados en líneas, enlaces y nodos que se ubican en el plano cartesiano. La información está proyectada en el sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (UTM¹³). Es importante que las imágenes ráster se encuentren proyectadas en el mismo sistema de coordenadas o de lo contrario las operaciones realizadas a partir de ellas pueden inducir errores. Los centros de los píxeles son útiles para considerarlos nodos que conectan los tramos de línea dentro de la ruta, por lo tanto, el tamaño de la celda w es considerado para el cálculo de la distancia total de la LT.

En relación con lo anterior, la imagen figura 3.8b muestra el enlace creado entre una celda i con respecto a sus celdas vecinas j , donde $(i, j) \in \mathcal{E}$; estos enlaces representan a los tramos de línea de transmisión. Además, los nodos del ráster recibieron un nombre identificador que permite identificar su posición geográfica con respecto a los demás, lo cual es útil para la lectura de la información previo a resolver el problema de optimización. Por lo tanto, al resolver el problema de optimización se obtiene el conjunto de nodos que pertenecen a la ruta p , donde $p \in \mathcal{P}$.

¹³ Por sus siglas en inglés Universal Transverse Mercator

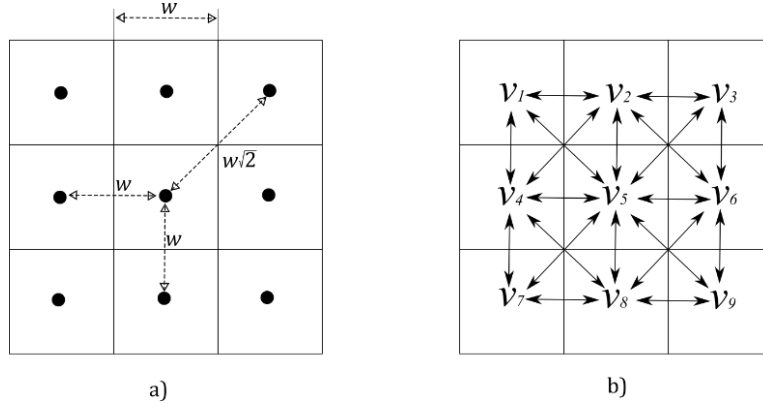


Figura 3.8: Estructura de los datos del ráster. (a) Definición de la distancia entre celdas. (b) Enlaces entre los nodos de las celdas.

La expresión (3.3) obtiene la distancia de los enlaces (i, j) que conectan los tramos de línea para tramos horizontales o verticales, y se multiplica por el factor $\sqrt{2}$ para los tramos diagonales. Además, la distancia es útil para estimar la longitud total de la línea y su perfil topográfico.

$$d_{ij} = \begin{cases} w, & \text{si horizontal o vertical} \\ \sqrt{2} \cdot w, & \text{si diagonal} \end{cases}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (3.3)$$

3.1.3. Adquirir rutas

En esta sección se presenta la formulación para generar rutas alternativas. La formulación está representada a través de programación entera, la cual permite abordar de forma eficiente este tipo de problemas cuando la cantidad de nodos y rutas posibles son significativas. En este trabajo, para obtener las rutas alternativas se considera la combinación de los criterios socio-ambientales y técnicos descritos en la sección 3.1.1.

3.1.3.1. Problema de optimización

Esta formulación corresponde a aquella desarrollada para encontrar el camino más corto. De esta manera, la formulación viene dada por un grafo dirigido $G = (\mathcal{N}, \mathcal{E})$, donde \mathcal{N} es el conjunto de nodos y \mathcal{E} es el conjunto de tramos de línea de transmisión, se desea encontrar un camino $p = (v_s, \dots, v_t)$, donde $v_i \in \mathcal{N}$. Cada enlace $(v_i, v_j) \in \mathcal{E}$ tiene una ponderación asociada a los criterios socio-ambientales y técnicos. De esta manera, un camino $p \in \mathcal{P}$ tendrá un peso combinado correspondiente a la suma de las ponderaciones de los tramos de línea transitados.

La formulación del modelo para el problema en cuestión es representada mediante la función objetivo de acuerdo con (3.4), la cual contiene la ponderación combinada total de los criterios

antes mencionados. La función objetivo está bajo la restricción de (3.5). En el Anexo A se detalla las condiciones de operación de la formulación del camino más corto.

$$\min_{x_{ij}} \sum_i \sum_j x_{ij} \cdot (Q^{AMB} \cdot W_{ij}^{AMB} + Q^{TEC} \cdot W_{ij}^{TEC}) \quad (3.4)$$

Sujeto a:

$$\sum_{\{i|(i,j) \in \mathcal{E}\}} x_{ij} - \sum_{\{j|(j,i) \in \mathcal{E}\}} x_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{si } i = s \\ -1, & \text{si } j = t \\ 0, & \text{si } \sim \end{cases} \quad (3.5)$$

Donde, las variables de decisión x_{ij} indican si un enlace (v_i, v_j) forma parte de la ruta más corta, es decir, si existe un tramo (i, j) es (1), o no existe (0). Seguidamente, la variable x_{ij} es multiplicada por la ponderación estimada en dichos enlaces (i, j) , la cual está distribuida entre los parámetros W_{ij}^{AMB} y W_{ij}^{TEC} que representan la ponderación de los criterios socio-ambientales y los criterios técnicos, respectivamente. Así mismo, cada miembro de la ponderación de los criterios de interés es multiplicado por su parámetro correspondiente Q^{AMB} y Q^{TEC} , para otorgar mayor grado de relevancia a uno de criterios. Por ejemplo, estos factores permiten que la ponderación socio-ambiental sea mayor que la ponderación técnica en la medida que aquellas zonas de alto interés social no sean atravesadas por la línea de transmisión, y que permita a la ruta posicionarse en función de la topografía en áreas de bajo impacto socio-ambiental.

En relación con lo anterior, los parámetros asociados a los criterios socio-ambientales y técnicos (topográficos) dentro del problema de optimización, se definen por el conjunto de ecuaciones (3.6) – (3.14). Por lo tanto, W_{ij}^{AMB} representa a los parámetros asociados a los criterios socio-ambientales y se establecen sus valores según el conjunto de ecuaciones (3.6) – (3.8). De la misma manera, el parámetro W_{ij}^{TEC} está asociado a los criterios técnicos que se establecen en las ecuaciones (3.9) – (3.13).

La expresión (3.6) define la ponderación del tramo de línea entre el nodo i y el nodo j , y estas son multiplicadas por $\sqrt{2}$ dependiendo la dirección del tramo de línea:

$$W_{ij}^{AMB} = \begin{cases} A_{ij}, & \text{si } horizontal \text{ o } vertical \\ \sqrt{2} \cdot A_{ij}, & \text{si } diagonal \end{cases}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (3.6)$$

El parámetro B_i^{AMB} contiene el valor del criterio socio-ambiental en el nodo i . El promedio del valor ponderado entre un tramo de línea (i, j) se obtiene a través del parámetro A_{ij} , representado en la ecuación (3.7)::

$$A_{ij} = \frac{B_i^{AMB} + B_j^{AMB}}{2}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E}, i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N} \quad (3.7)$$

En relación con lo anterior, el parámetro B_i^{AMB} es calculado mediante (3.8), que contiene la suma algebraica de los valores superpuestos en un nodo i , y multiplicado por un factor de

impacto I_k^{AMB} que permite otorgar una relevancia entre las distintas capas k del set \mathcal{L} de criterios socio-ambientales:

$$B_i^{AMB} = \sum_k B_{i,k} \cdot I_k^{AMB}, \quad \forall i \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{L} \quad (3.8)$$

Por otro lado, la ponderación asociada a los criterios técnicos W_{ij}^{TEC} que está definida de acuerdo con la función objetivo del modelo (3.4), se encuentra distribuida entre dos componentes R_{ij}^{ELV} y T_{ij}^{SLP} , que se asocian al ángulo de inclinación y al ángulo de pendiente entre los nodos de un tramo de ruta, respectivamente. Adicionalmente, el parámetro λ define la combinación lineal entre ambos factores. El valor total ponderado de los parámetros asociados a los criterios técnicos se establece según la ecuación (3.9):

$$W_{ij}^{TEC} = R_{ij}^{ELV} \cdot \lambda + (1 - \lambda) \cdot T_{ij}^{SLP}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E}, \lambda \in [0,1] \quad (3.9)$$

La expresión (3.10) define la ponderación general asociada a la penalización R_{ij}^{ELV} , que tiene relación con el ángulo de elevación o depresión de los tramos de línea. La penalización se obtiene mediante de la evaluación de la función cuadrática $f(\alpha_{ij})$ descrita por (3.12), con el propósito de otorgar menor oposición a los ángulos de elevación menores con respecto a los que son mayores:

$$R_{ij}^{ELV} = \begin{cases} f(\alpha_{ij}), & \text{si horizontal o vertical} \\ \sqrt{2} \cdot f(\alpha_{ij}), & \text{si diagonal} \end{cases}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (3.10)$$

La expresión (3.11) contiene la ponderación general asociada a la penalización T_{ij}^{SLP} , que tiene relación con el ángulo de pendiente de los tramos de línea. La penalización se obtiene mediante de la evaluación de la función cuadrática $f(\beta_{ij})$ descrita por (3.13), con el propósito de otorgar menor oposición a los ángulos de pendiente menores con respecto a los que son mayores:

$$T_{ij}^{SLP} = \begin{cases} f(\beta_{ij}), & \text{si horizontal o vertical} \\ \sqrt{2} \cdot f(\beta_{ij}), & \text{si diagonal} \end{cases}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (3.11)$$

Las funciones cuadráticas (3.12) y (3.13) penalizan el ángulo α y β existente entre un par de nodos (i, j) , para representar los criterios técnicos considerados en la sección 3.1.1.2. Además, los términos lineales H , J y L dentro de las funciones cuadráticas son utilizadas para ajustar la forma de curva de la penalización según sea necesario:

$$f(\alpha_{ij}) = H^{ELV} \cdot \alpha_{ij}^2 + J^{ELV} \cdot \alpha_{ij} + L^{ELV}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (3.12)$$

$$f(\beta_{ij}) = H^{SLP} \cdot \beta_{ij}^2 + J^{SLP} \cdot \beta_{ij} + L^{SLP}, \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (3.13)$$

En relación con el modelo planteado previamente, el conjunto de rutas \mathcal{P} contiene las soluciones del problema de optimización con distintos parámetros. En ese sentido, cada ruta se resolvió en base a una variación de la ponderación dentro de la función objetivo del modelo (3.4), a través de los parámetros Q^{AMB} y Q^{TEC} . De la misma manera, en la ecuación (3.9) a través de la variación de λ , se cambia la ponderación total del criterio técnico W_{ij}^{TEC} que contiene la importancia entre considerar los ángulos de elevación α_{ij} o los ángulos de pendiente β_{ij} dentro de la ruta.

Para generar un conjunto de rutas como lo desarrollado en los casos de estudio de la sección 4, los valores de los parámetros Q^{AMB} y Q^{TEC} fueron definidos de manera arbitraria utilizando un intervalo cerrado de números en la iteración. Esto se definió en medida a que dichos rangos de valores permitieron generar una diversidad de rutas a lo largo de las zonas factibles dentro del área de estudio para cada caso en cuestión. Sin embargo, la tendencia general encontrada fue que $Q^{AMB} > Q^{TEC}$, debido a que a una mayor penalización de los criterios socio-ambientales contribuye a que estas áreas restrictivas no sean factibles para el posicionamiento de la ruta de la línea de transmisión. Finalmente, el parámetro λ para combinar los criterios técnicos tiene un intervalo continuo definido entre $[0,1]$, y se evaluó de manera granular en medida que contribuyo a la diversificación de alternativas de ruta.

Algoritmo de Dijkstra

Para resolver el problema de optimización presentado por la función objetivo del modelo en (3.4) y la restricción (3.5), el método de Dijkstra [21] fue utilizado. El método de Dijkstra es un algoritmo basado en Programación Dinámica, que resuelve el problema de búsqueda de LCPs de manera eficiente. Sin embargo, resolver el LCP puede llegar a ser costoso en tiempo de resolución computacional. Por este motivo, el lenguaje de programación Julia [30] fue utilizado debido a que este lenguaje presenta beneficios al resolver Dijkstra, obteniendo una reducción sustancial del tiempo de procesamiento computacional.

3.1.4. Clusterización

La ejecución del modelo matemático entregó como resultado un conjunto de rutas \mathcal{P} que pueden ser semejantes o no entre sí. Por lo tanto, para distinguir la ubicación de las rutas en el mapa, es necesario clusterizar las rutas dentro del AE mediante técnicas destinadas a analizar las celdas o nodos adyacentes entre sí. De esta manera, un clúster puede representar un conjunto de similares características topográficas, sociales, ambientales, económicas, etc. En ese sentido, el número de clústeres debe ser aquel que defina una diversidad diferenciable en el área de interés. Dicho lo anterior, el siguiente paso es aplicar Elbow Method y k-means, los cuales son métodos que permiten identificar los datos y formar clústeres a partir de ellos.

3.1.4.1. Elbow Method y k-means

Las rutas de las líneas de transmisión al estar posicionadas geográficamente dentro del mapa pueden compartir entre ellas la misma posición o tener cierta cercanía, lo cual permite formar

clústeres a través de esta característica. Las distintas posiciones geográficas de las rutas de línea de transmisión pueden ser reconocidas a través de la inteligencia artificial usando los métodos aprendizaje profundo que facilitan el reconocimiento de una amplia gama de características. La red neuronal convolucional (CNN¹⁴) es uno de los métodos más populares utilizados en aprendizaje profundo [31]. Por lo tanto, CNN es ampliamente utilizado como método de clasificación de objetos, lo cual es un importante desarrollo para el análisis de imágenes.

En el presente trabajo se utilizó CNN VGG16, el cual ha sido entrenado previamente para utilizar pequeños conjuntos de datos para permitir la agrupación en función de cuán similares sean los vectores de características o datos invariantes. Para identificar individualmente las características de las rutas, se utilizó imágenes binarias de relación de aspecto 1:1 de sus píxeles, y cada imagen fue almacenada en formato png para garantizar su compatibilidad con el proceso de carga de los datos. Los píxeles de cada imagen forman la ruta que describe a la línea de transmisión, esto facilitó el reconocimiento por parte del CNN VGG16, el cual entrega como resultado el vector de características necesario para la clusterización.

En relación con lo anterior, se genera un vector de 4096 números, el cual es el vector de características que se utiliza para agrupar las imágenes. En ese sentido, al trabajar con datos que consideran muchas variables, se puede aplicar el Análisis de Componentes Principales (PCA¹⁵) para reducir la cantidad de variables mientras conserva la mayor cantidad de información posible del conjunto original. Al reducir el número de variables, se contribuye a la reducción de tiempo de procesamiento computacional, además, se puede eliminar información redundante.

Para la clusterización se determinó el número de clústeres que se pueden obtener al utilizar sus características a través del Método del Codo¹⁶. El método del codo se basa en el algoritmo de k-means que minimiza la suma de las distancias cuadráticas de cada ruta al centroide de su clúster, lo cual es útil para determinar el número k óptimo de clústeres de rutas [32]. El parámetro k se obtiene al probar un rango de valores en cuestión, que luego son representados gráficamente y permite identificar el punto de curvatura (codo) a partir del cual el porcentaje de varianza total de los datos disminuye de forma notable.

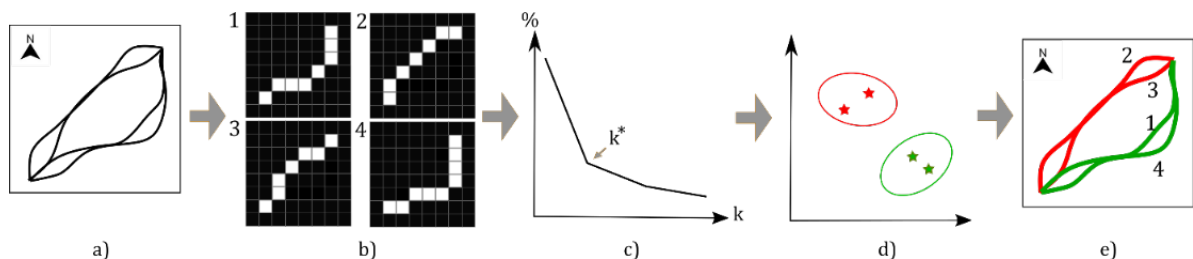


Figura 3.9: Proceso de clusterización general. (a) Conjunto de rutas de líneas de líneas de transmisión. (b) Imágenes binarias generadas para CNN. (c) Aplicación del método del codo. (d) Clusterización con k-means. (e) Clústeres resultantes.

¹⁴ Por sus siglas en inglés Convolutional Neural Network

¹⁵ Por sus siglas en inglés Principal Component Analysis

¹⁶ Por su significado en inglés Elbow Method

Finalmente, los clústeres de rutas de líneas de transmisión son obtenidas al agrupar las características obtenidas con CNN. Al aplicar el número de k clústeres, la suma de las varianzas internas de los clústeres alcanza su valor mínimo posible, lo que permite identificar cada ruta y asociarla a un clúster en particular. Cada clúster posteriormente es identificado a través de un color y un nombre que facilitan la visualización y su acceso a los datos. La figura 3.9 muestra brevemente las etapas del proceso de aplicado para la clusterización de rutas.

3.1.4.2. Criterios mínimo-promedio y mínimo-máximo

En relación con la función objetivo (FO) para generar rutas, la variación de unos de los parámetros conduce a un nuevo problema de optimización compuesto con su FO a ser resuelto. Por lo tanto, al resolver el problema de optimización se obtiene como resultado una ruta óptima que se ajusta a los parámetros ingresados. Por motivo de lo anterior, cuando una ruta es evaluada desde el punto de vista de una función objetivo distinta a su correspondiente, su ponderación relativa se incrementa debido a la evaluación subóptima que se realiza.

En relación con lo anterior, una ponderación mayor de ruta con respecto a otras, indirectamente influencia en el costo de esta. Por lo tanto, se puede comparar cada ruta desde el punto de vista de distintas funciones objetivo para determinar la influencia ponderada entre ellas. Para lograrlo, se crea una matriz de evaluación que asocia las funciones objetivo de las distintas rutas con la selección de una determinada ruta. La tabla 3.2 muestra la organización de los datos para la evaluación del conjunto de rutas de manera recíproca con sus funciones objetivo.

| | FO_1 | FO_2 | ... | FO_n |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| $ruta^1$ | C_1^1 | C_2^1 | ... | C_n^1 |
| $ruta^2$ | C_1^2 | C_2^2 | ... | C_n^2 |
| \vdots | \vdots | \vdots | \ddots | \vdots |
| $ruta^m$ | C_1^m | C_2^m | ... | C_n^m |

a)

| Mínimo | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Promedio | Máximo |
| $ave\{C_1^1, C_2^1, \dots, C_n^1\}$ | $máx\{C_1^1, C_2^1, \dots, C_n^1\}$ |
| $ave\{C_1^2, C_2^2, \dots, C_n^2\}$ | $máx\{C_1^2, C_2^2, \dots, C_n^2\}$ |
| \vdots | \vdots |
| $ave\{C_1^m, C_2^m, \dots, C_n^m\}$ | $máx\{C_1^m, C_2^m, \dots, C_n^m\}$ |

b)

Tabla 3.2: Comparación de una ruta desde el punto de vista de distintas funciones objetivo. a) Matriz de evaluación (ponderaciones). b) Criterios mínimo-promedio y mínimo-máximo.

La tabla 3.2a muestra de forma genérica como se encuentran organizadas las ponderaciones de una determinada cantidad de m rutas, que le corresponden n funciones objetivo FO_n , donde $n, m \in \mathcal{P}$. El proceso de evaluación se realiza con cada función objetivo FO_n y con los nodos que componen la $ruta^m$, por lo tanto, el resultado entrega la ponderación C_n^m . Para los casos que n es igual a m , el valor es el óptimo y se toma como referencia para comparar las otras rutas para m distinta.

Por consiguiente, al dividir los valores numéricos en cada columna con el valor ubicado en la diagonal principal de matriz, se obtiene el valor expresado en por unidad. De esta manera se obtiene la matriz de evaluación que representa la ponderación de cada ruta desde el punto de vista de distintas funciones objetivo. Por lo tanto, la matriz de evaluación de ponderaciones resultante fue utilizada para aplicar los criterios de mínimo-promedio y mínimo-máximo, los

cuales pueden ayudar a seleccionar una ruta que sea la más atractiva o representativa entre las demás desde el criterio del mínimo valor relativo.

La tabla 3.2b muestra la forma genérica de los criterios de mínimo-promedio y mínimo-máximo. Cada columna representa un vector que contiene los valores promedios y valor máximo de cada fila de la matriz de evaluación respectivamente. Los valores dentro de estos vectores corresponden a cada una de las rutas, que al aplicar la función minimizar, se obtiene la ruta que tiene la ventaja en complejidad ponderada frente a las demás rutas pertenecientes a un clúster. En la mayoría de los casos, la ruta designada por cada criterio llegó a seleccionarse coincidentemente, confirmando de esta manera su optimalidad frente a las demás.

El criterio de mínimo-promedio consiste en formar un vector que contenga el promedio de cada fila (una ruta evaluada recíprocamente con cada FO) de la matriz de evaluación. El vector que contiene los promedios de cada fila es utilizado para hallar la posición de su valor mínimo. La posición del valor mínimo dentro vector representa una ruta en particular, que a su vez tiene la menor ponderación en promedio frente a las demás alternativas.

Por otro lado, el criterio de mínimo-máximo, consiste en formar un vector que extraiga el valor máximo de cada fila de la matriz de evaluación. El vector que contiene el máximo de cada fila es utilizado para encontrar la posición de su valor mínimo. La posición del valor mínimo dentro del vector representa a una ruta en particular, que a su vez tiene el menor valor total entre sus máximos frente a las demás alternativas.

3.1.5. Suavizar rutas

El proceso de enrutamiento es dirigido a través del problema de optimización. Los datos de la capa ráster provienen de polígonos (figura 3.10a) o de rásteres a una cierta resolución. En ese sentido, los datos de los rásteres forman una matriz de dimensiones n filas y m columnas, donde cada posición forma parte del set de nodos $i \in \mathcal{N}$, que a su vez es un subconjunto de \mathbb{N} . Adicionalmente, cada nodo i tiene una conexión con sus nodos j vecinos, donde $j \in \mathcal{N}$, formándose de esta manera una estructura de enlaces $(i, j) \in \mathcal{E}$. Por lo tanto, para el almacenamiento de la información asociada a las conexiones entre cada nodo con sus vecinos, es creada una matriz cuadrada $A_{k,k}$, donde k es cantidad total de nodos i dentro del ráster.

Como resultado de lo anterior, el espacio de memoria computacional requerido tiende a crecer exponencialmente cuando el ráster contiene mayor densidad de resolución de datos (menor tamaño de celda). Sin embargo, es posible gestionar de manera eficiente la utilización del espacio de memoria si es aplicado cuatro pasos mencionados a continuación: (i) obtener de la primera ruta guía mediante el uso de un ráster de menor resolución (mayor tamaño de celda); (ii) generar y seleccionar un búfer de celdas alrededor de la primera ruta guía; (iii) cambiar el ráster hacia una mayor resolución; (iv) seleccionar las celdas redimensionadas dentro del búfer para generar una nueva estructura de enlaces en base, y resolver el problema de optimización nuevamente.

Por lo mencionado anteriormente, para el presente trabajo se consideró el tamaño de celda de 50x50 m para los rásteres iniciales que almacenan los datos de entrada. Sin embargo, utilizar

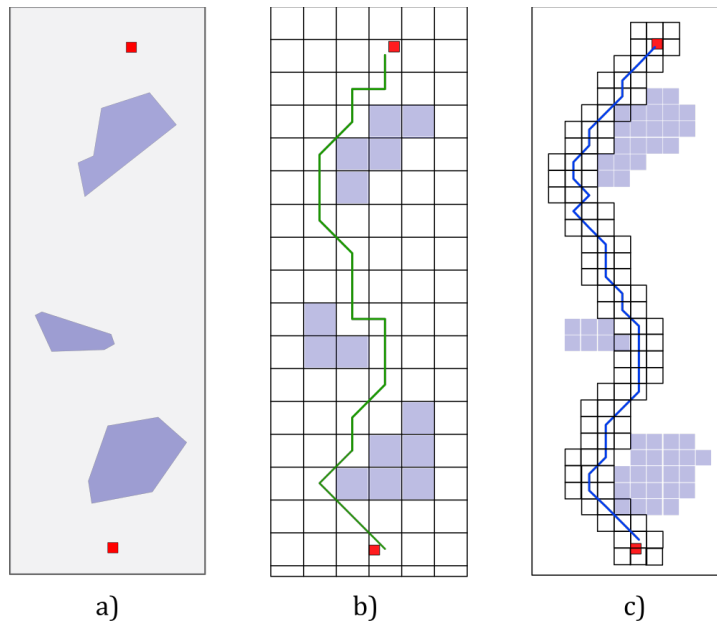


Figura 3.10: Redimensionamiento de rásteres para el enrutamiento (a) Capa de criterios generales inicial. (b) Capa rasterizada a menor resolución, para adquirir la ruta guía. (c) Capa de mayor resolución, asociada a la rasterización de las celdas vecinas de la ruta guía.

tal resolución del ráster puede ralentizar el tiempo computacional y superar el límite de memoria dependiendo de la extensión del AE. Por este motivo, se obtuvo la ruta guía de línea de transmisión utilizando inicialmente una menor resolución del ráster para acelerar el procesamiento computacional, por ejemplo, se utilizó 400x400m como se ilustra en la figura 3.10b. En ese sentido, todas las alternativas de ruta fueron adquiridas utilizando esta misma resolución del ráster.

Después del proceso de clusterización y de selección de las rutas, el conjunto de rutas destacadas por clúster se obtuvo a través de los criterios de mínimo-promedio y mínimo-máximo. Sin embargo, las rutas resultantes tienen una baja resolución, lo cual induce a la pérdida de la información que podría mejorar el detalle de la ruta en la resolución del problema de optimización. Por lo tanto, el tamaño de celda del ráster fue reajustado, por ejemplo, a 100x100 m para mejorar la información de los resultados. Para el reajuste del tamaño se utilizó la ruta como una guía para seleccionar un buffer de píxeles vecinos por donde atraviesa la ruta dentro del nuevo ráster de mayor resolución.

En sentido de lo anterior, las celdas del ráster con mayor resolución, asociadas a las celdas vecinas de la ruta guía, ingresan nuevamente al problema de optimización para recalcular la ruta y que ésta considere la nueva información. La figura 3.10c ilustra la selección de píxeles y la ruta calculada a partir del nuevo ráster. Sin embargo, en el proceso de enrutamiento se producen variaciones bruscas o zigzagueos en el posicionamiento de los nodos que conectan la línea de transmisión. Por lo tanto, el zigzag presente en la ruta de guía puede estar compuesto por ángulos de deflexión cerrados que difieren de una ruta guía realista.

Por consiguiente, la importancia de reducir el zigzag radica en la necesidad de facilitar la construcción de la obra al conformarlo por tramos rectos, y permite reducir la cantidad de

torres de transmisión angulares utilizadas para sostener ángulos pronunciados que se encuentran desde los 3° hasta 45° [28]. Las torres angulares están constituidas estructuralmente con mayor resistencia mecánica y por ende contiene mayor cantidad de material. Además, para soportar las tensiones de flecha existentes en la torre es necesario fundiciones más grandes previo a la colocación de la torre en cuestión; lo cual representa un mayor costo económico. Por lo tanto, los costos de este tipo de torres son superiores a las torres de suspensión utilizadas en tramos rectos de línea de transmisión y pueden dificultar algunas decisiones técnicas y económicas al encarecer la obra.

Por motivo de lo anterior, para obtener una ruta más realista y así poder apalejar el uso de torres angulares dentro de la ruta, se aplicó un proceso de suavizado de las rutas. Para conseguirlo, el algoritmo (Optimal) Rapid Random Trees fue utilizado para crear tramos rectilíneos dentro de un corredor.

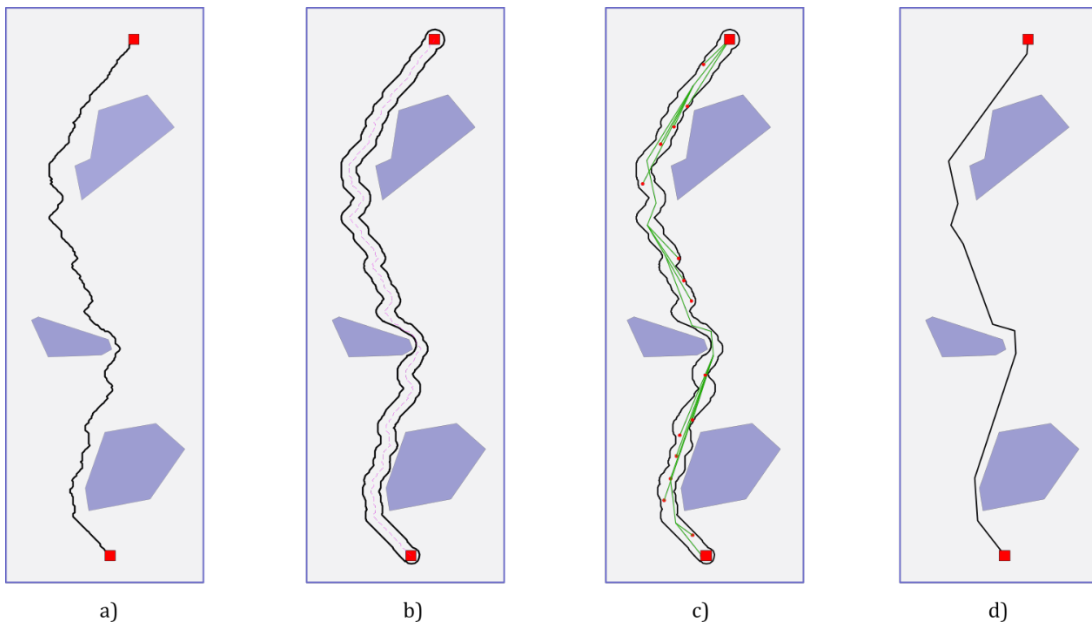
3.1.5.1. Rapidly Exploring Random Trees

El suavizado tiene como objetivo eliminar o reducir el zigzagado que se presente dentro de la ruta guía. Para lograrlo, en la línea guía de la ruta se agregó una línea búfer de un determinado ancho que permite el posicionamiento de manera holgada. Por lo tanto, el corredor contribuye al posicionamiento de tal manera que se minimiza la cantidad de vértices dentro de la ruta, los cuales están interconectados con tramos rectilíneos.

En relación con lo anterior, el algoritmo RRT tiene la capacidad de explorar rápidamente el entorno de navegación y entregar una solución. En este algoritmo, los nodos dentro del entorno de navegación se escogen aleatoriamente. Cada nodo escogido se agrega al nodo más cercano del árbol si el segmento de línea recta formado por esos nodos está libre de colisiones. De esta manera, la búsqueda se expande hasta que se encuentra una ruta entre los puntos de origen y destino [33].

La característica principal de la información proveniente de zonas rasterizadas es que el espacio se encuentra discretizado. Por lo tanto, la ubicación de los nodos que interconectan la ruta guía de la línea de transmisión se ubica en torno a la cuadrícula formada. Sin embargo, en lugar de utilizar esta discretización, se utilizó un algoritmo de muestreo muy común en el campo de la robótica: (Optimal) Rapid Random Trees (RRT*) [33]. El algoritmo de RRT* también es aplicado para resolver el problema de ruteo en el campo de la planificación de la transmisión como lo describen en [7].

En la figura 3.11a se muestra una de las rutas que presenta zigzagado. Para suavizar, se crea un búfer definido entre 400 m hasta 3 km alrededor de la ruta, como se muestra en la figura 3.11b. En la figura 3.11c se ilustra la ejecución del algoritmo RRT* dentro del espacio de navegación del búfer, donde se posiciona los nodos (puntos rojos) son parte del árbol de conexiones (líneas verdes) hasta alcanzar el destino. Como resultado de lo anterior, la figura 3.11d muestra la ruta formada a través de rectilíneas que representa la versión suavizada formada a través de rectilíneas de la ruta inicial. En ese sentido, en el presente trabajo se aplicó proceso de suavizado a las rutas representativas de cada uno de los clústeres.



a) Ruta inicial. (b) Búfer de la ruta. (c) Ejecución del algoritmo RRT*. (d) Resultado de ruta suavizada.

Capítulo 4

Resultados y discusión

Visión General

Para demostrar la efectividad de la metodología propuesta para generar alternativas de ruta para líneas de transmisión, se presentan 3 casos de estudio basados en proyectos del mundo real en el sector de la transmisión chilena. El recurso computacional utilizado en el desarrollo de las pruebas fue un computador personal con un procesador de 2.7GHz Intel i7-7500U y 24GB de RAM. Además, la información técnica para los casos de estudio se obtuvieron de los documentos de los planes de expansión anual de la transmisión eléctrica disponible en la Comisión Nacional de Energía (CNE) [34]. El software QGIS se utilizó en el manejo de las capas ráster iniciales, además, el sistema de referencia SIRGAS UTM 19S fue utilizado para las operaciones ráster de las capas de información en los 3 casos de estudio propuestos.

4.1. Caso de estudio 1: Atacama - Coquimbo

4.1.1. Datos de entrada

Se presenta un caso de estudio localizado en la Pampa Transicional, entre la Región de Atacama y la Región de Coquimbo, que conecta las comunas de Freirina y Coquimbo. En este caso se necesita realizar la instalación de una línea de transmisión, doble circuito de 220 kV, desde la subestación de origen Maitencillo (311676.12E, 6842046.02N), hasta la subestación de destino Punta Colorada (301229.76E, 6749600.72N). La distancia aproximada es de 95 km entre las dos subestaciones. La extensión del área de estudio planteado forma un rectángulo de dimensiones 35x98 km. En el área seleccionada, se encuentran asentamientos humanos por parte de comunidades indígenas y urbanizaciones. Además, el área contiene vías de acceso como carreteras primarias y secundarias. La ponderación para estas capas está basada en los valores descritos en la sección 3.1.1.

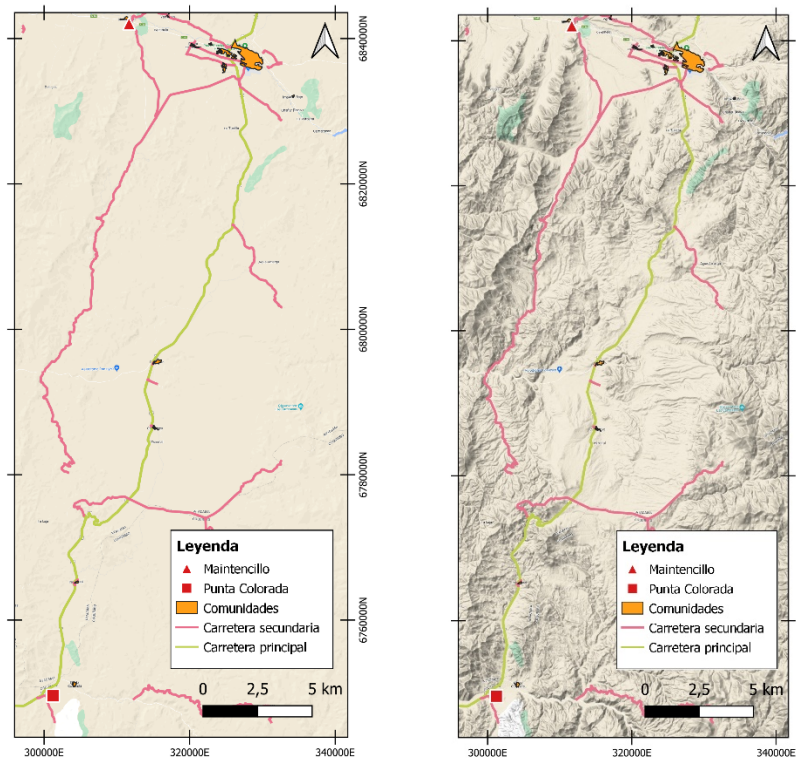


Figura 4.1: Área de caso de estudio 1.

4.1.2. Resultados

Para obtener las rutas iniciales que sirven de guía para el trayecto de ruta, la dimensión de las celdas del ráster utilizado fue de 500x500 m. Esta dimensión de celda contribuyó a reducir la carga computacional en el enrutamiento. Sin embargo, para el proceso de suavizado de las rutas finales, la dimensión de celdas del ráster fue 100x100 m con el propósito de brindar mayor detalle en el trazado de la ruta.

La figura 4.2a muestra el geoposicionamiento de 43 rutas encontradas luego de resolverse el problema de optimización para un determinado set de parámetros de entrada. Mientras tanto, la figura 4.2b muestra los clústeres de las rutas formadas a partir de la similitud entre ellas al aplicarse CNN. Por lo tanto, se obtuvieron 4 clústeres que fueron identificados por colores únicos. Además, cada clúster contiene un determinado número determinado de rutas semejantes como resultado de la clusterización.

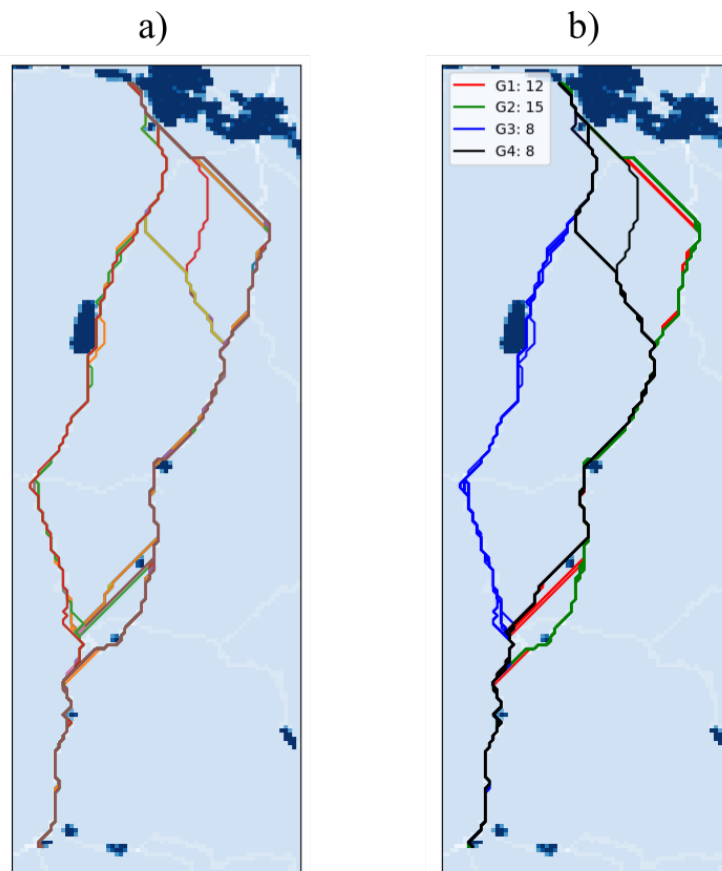


Figura 4.2: Set de rutas geoposicionadas del caso de estudio 1. (a) Set de rutas generadas. (b) Set de rutas clusterizadas.

La figura 4.3 muestra los 43 perfiles de altura asociados a los 4 clústeres de rutas definidos en la figura 4.2b. La longitud promedio de las rutas está en 118 km y su perfil de altura cambia según la topografía dependiendo del lugar geográfico que cada tramo de línea atraviesa. Por lo tanto, en esta etapa fue indispensable seleccionar para cada clúster una ruta representativa que contenga las características geográficas, y que presente beneficios respecto a las demás alternativas dentro del mismo clúster. En ese sentido, se adquirió la ruta representativa de cada clúster al utilizarse los criterios de selección mínimo-promedio y mínimo-máximo.

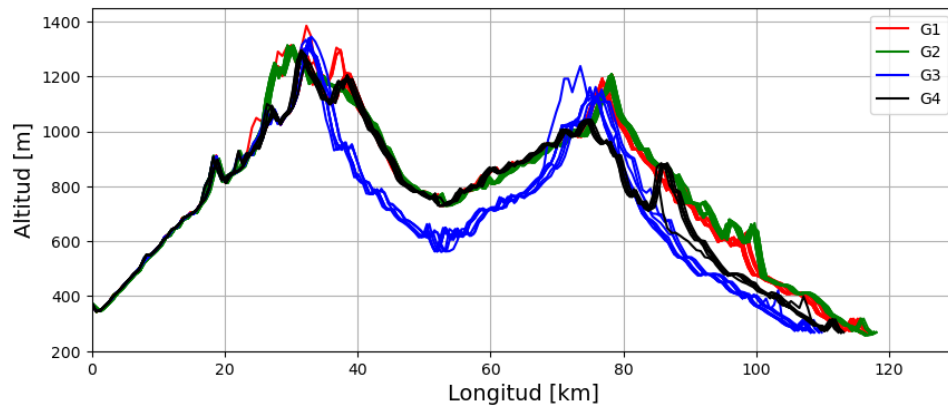


Figura 4.3: Perfiles de altura del set de rutas clusterizadas del caso de estudio 1.

La figura 4.4 muestra las etapas desarrolladas para el suavizado de la trayectoria, además, las rutas fueron establecidas utilizando el ráster con resolución 100x100 m. La figura 4.4a contiene las rutas iniciales, donde cada una de ellas representa a un clúster; estas rutas presentaron zigzagado en sus trayectorias. Por lo tanto, la figura 4.4b ilustra el búfer de 800 m creado alrededor de las líneas guía de la figura 4.4a, con el propósito de brindar el espacio necesario para la conexión de la trayectoria a través de tramos rectilíneos. En ese sentido, la búsqueda de los puntos vértices se realizó utilizando el algoritmo de RRT*. En la figura 4.4c se establecen las rutas finales resultantes del proceso de suavizado, donde cada ruta está formada por tramos rectilíneos.

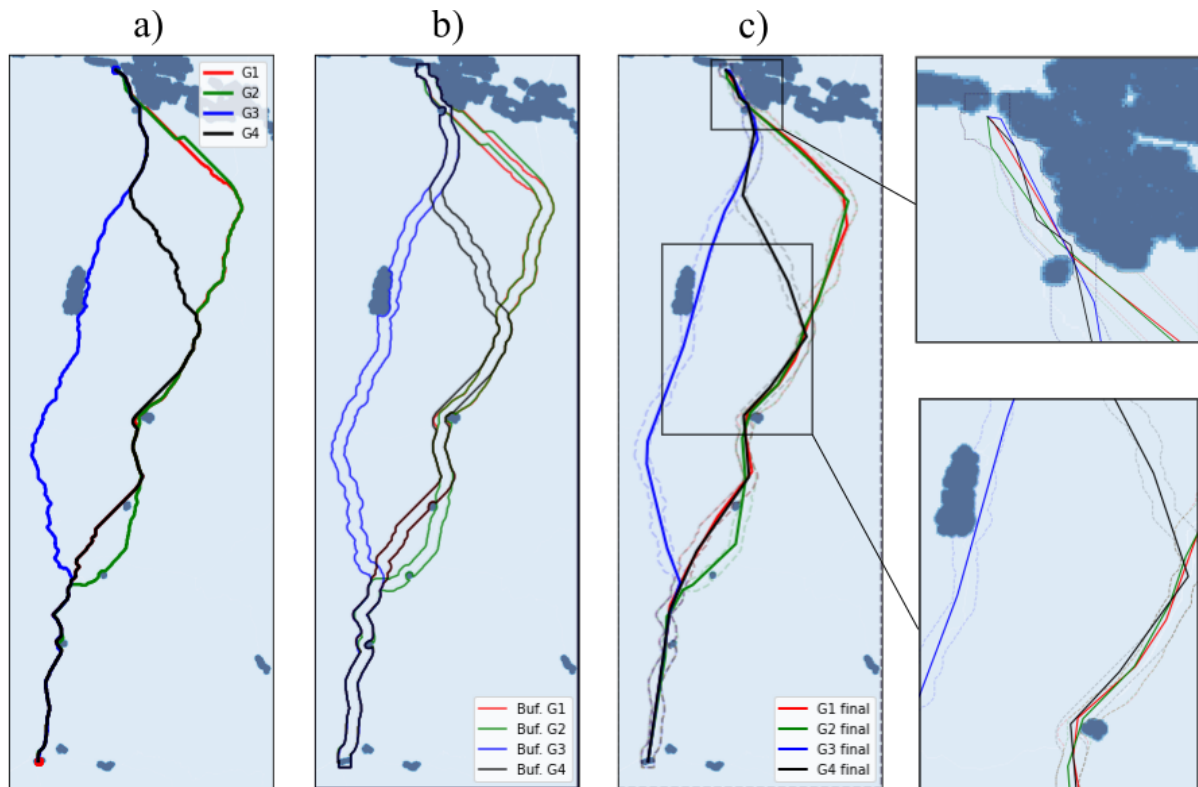


Figura 4.4: Etapas de los clústeres de rutas del caso de estudio 1. (a) Rutas iniciales. (b) Búfer de las rutas. (c) Rutas suavizadas.

En la figura 4.5 se muestran los perfiles de altura de las rutas originales representadas con líneas segmentadas, junto con los perfiles de altura de las rutas finales suavizadas de cada uno de los clústeres. Las rutas finales alcanzaron una menor longitud total de línea de transmisión con respecto a la ruta original debido al proceso de reducción del zigzagado ejecutado.

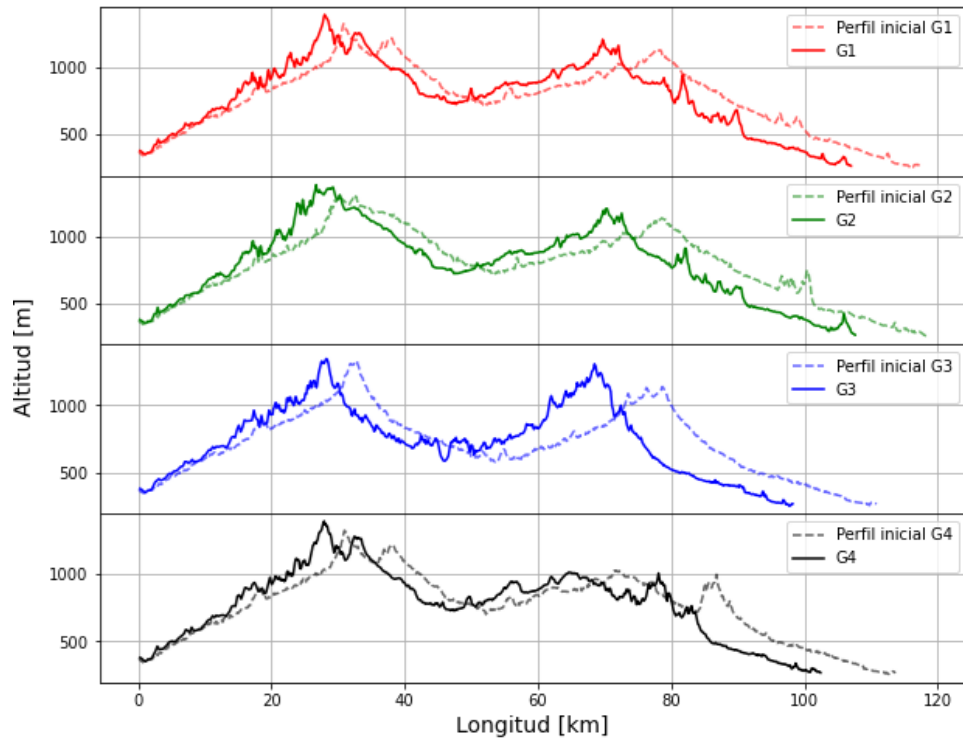


Figura 4.5: Perfiles de altura del caso de estudio 1, rutas iniciales vs suavizadas.

La figura 4.6 muestra las rutas finales posicionadas geográficamente en los mapas de criterios socio-ambientales, y en los mapas de criterios de técnicos asociados a la topografía como la elevación del terreno y la pendiente de inclinación, respectivamente. Estos mapas representan los criterios de interés relevantes ingresados al problema de optimización para el proceso de enrutamiento. Las rutas finales mostraron diversidad de posicionamientos en el mapa, lo cual contribuye a solventar el interés de los tomadores de decisiones.

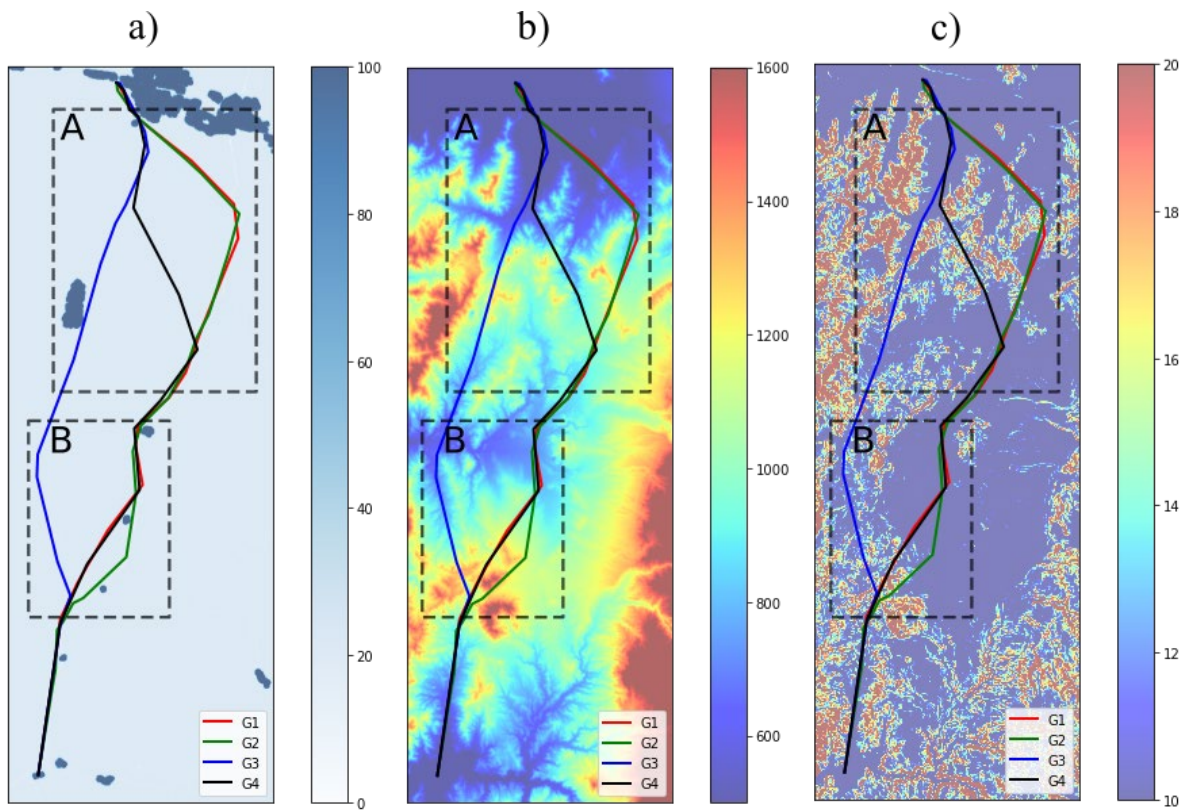


Figura 4.6: Rutas finales del caso de estudio 1. (a) Mapa ráster de criterios socio-ambientales. (b) Mapa ráster de elevación del terreno, expresado en m.s.n.m. (c) Mapa ráster de pendiente del terreno, expresado en grados.

En la figura 4.7 se muestran los perfiles de altura de las rutas finales de manera conjunta. Los tramos de ruta de ciertos clústeres se posicionaron a niveles de altura diversificados, que en conjunto con los mapas de la figura 4.6, permitieron obtener criterios relevantes en ciertas zonas que pueden contribuir a la toma de decisión.

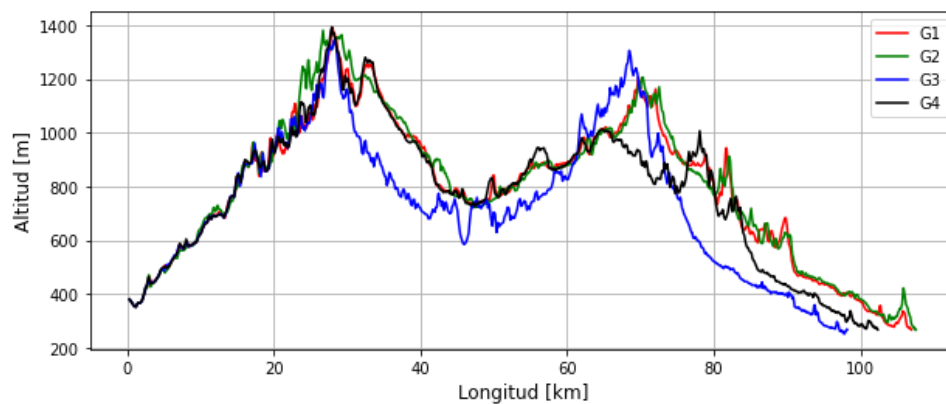


Figura 4.7: Perfiles de altura de rutas finales del caso de estudio 1.

4.1.3. Discusión

A continuación, se presenta la discusión de los resultados del caso de estudio 1, donde se contemplan consideraciones de carácter cualitativo en función de la geografía del terreno y del perfil de las rutas finales. Por lo tanto, se establecieron secciones (A y B) dentro del área de estudio que permitieron establecer las características de las distintas rutas que puedan ser de interés para la selección.

La figura 4.6 se encuentran las secciones A y B que permitieron focalizar los criterios de interés. Para la figura 4.6a, dentro del ráster se consideran las carreteras principales, las mismas que son preferibles para el posicionamiento de la línea de transmisión. Sin embargo, por motivo del nivel de importancia asignado a los criterios dentro del problema de optimización, existen tramos de línea que optarán por posicionarse en la carretera mientras que otros tramos tendrán prioridad por considerar criterios técnicos de la topografía.

En relación con lo anterior, la ruta G1 (rojo) utilizó la carretera principal para el posicionamiento de la ruta. Además, los tramos de las carreteras casi en su totalidad tienen ángulos de pendiente menores a 10° . Por lo tanto, esta característica facilita el transporte de materiales de construcción a través de carretera. Por otro lado, esta ruta comparte una gran parte de la ubicación de la ruta G2 (verde) dentro de la sección A.

La ruta G2 (verde), utilizó la carretera principal para el posicionamiento. Además, esta ruta comparte una gran parte de la trayectoria de la ruta G1. Sin embargo, es posible destacar una diferencia en el tramo de la sección B, donde la ruta optó por posicionarse sobre la carretera principal, mientras que la ruta G1 se posicionó al lado izquierdo bordeando las montañas en la sección B.

Para la ruta G3 (azul) se utilizó la carretera secundaria para su posicionamiento, la cual está en la sección A. Esta ruta tuvo una mayor prioridad de minimización de impacto social-ambiental ya que no consideró mayoritariamente los criterios topográficos, pero mantuvo su posición dentro de la carretera secundaria de la izquierda sin desviarse. Además, esta ruta es la más corta entre los clústeres.

Con respecto a la ruta G4 (negro), esta utilizó un gran tramo de carretera primaria y una porción de la carretera secundaria para llegar al destino. En la sección A se observa que esta ruta cruza una zona de menor elevación, probablemente por la importancia de minimizar pendientes. Por lo tanto, se está descuidando la minimización de los cambios de altura, como resultado se obtuvo un perfil de altura más irregular.

4.2. Caso de estudio 2: Coquimbo

4.2.1. Datos de entrada

Se presenta un caso de estudio localizado en la región de Coquimbo, provincias de Choapa y Limarí. En este caso se necesita realizar la instalación de una línea de transmisión, doble circuito

de 220kV, desde la subestación de origen, Centella (324377.12E, 6469004.85N), hasta la subestación de destino Punta Sierra (250814.38E, 6552321.63N). La distancia aproximada es de 114 km, entre las dos subestaciones. La extensión del área de estudio planteado forma un rectángulo de dimensiones 89x99 km. En el área seleccionada para el caso de estudio, se encuentran asentamientos humanos representadas en urbanizaciones en conjunto con las vías de acceso como carreteras, además, en el área se encuentran distintos bienes nacionales como parques nacionales. La figura 4.8 muestra el área de estudio planteado para el caso 2.

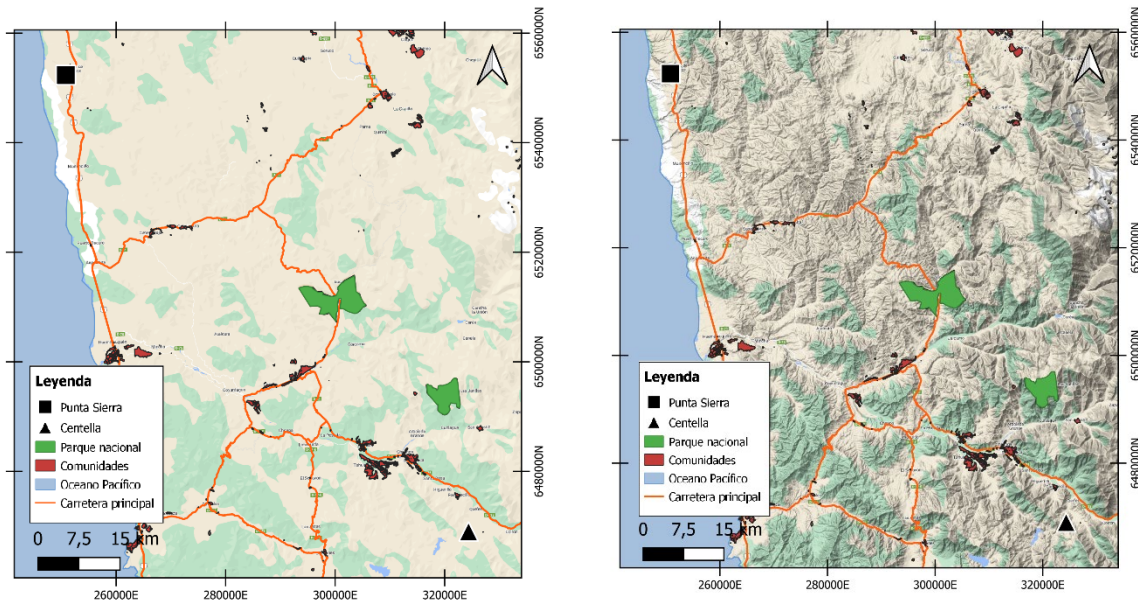


Figura 4.8: Área del caso de estudio 2.

4.2.2. Resultados

La figura 4.9 muestra las rutas finales encontradas para el caso de estudio 2. Previamente, para la obtención de las rutas iniciales se utilizó el tamaño de 800x800 m para las celdas; este tamaño fue necesario debido al tamaño del raster en el presente caso. En ese sentido, un tamaño grande de celda permitió mantener un tiempo de procesamiento adecuado. Como resultado del enrutamiento, se encontraron 104 rutas distintas, las cuales fueron procesadas por CNN para formar clústeres, después se determinó las rutas representativas por clúster.

En total se encontraron 4 rutas distintas, las cuales se encuentran identificadas por colores únicos por cada cluster. Para el proceso de suavizado se utilizó el tamaño de 200x200 m para las celdas, lo cual aportó en la adquisición de rutas con buena definición de datos. Con las rutas encontradas; además, el búfer de 800 m de ancho fue utilizado para el suavizado de las rutas finales.

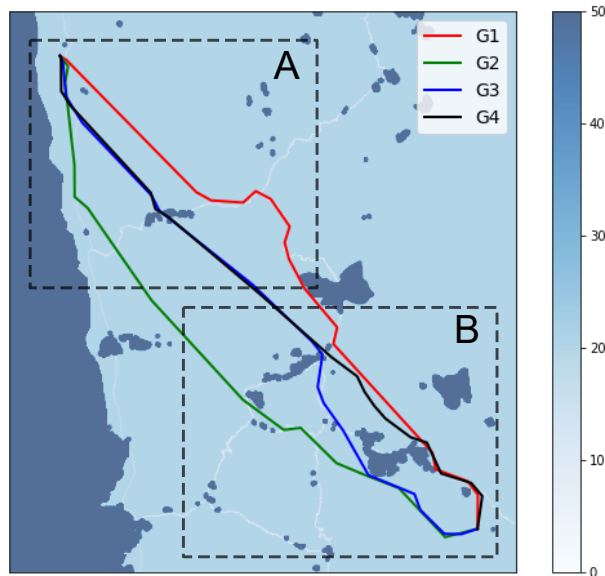


Figura 4.9: Rutas finales del caso de estudio 2 en el mapa ráster de criterios socio-ambientales.

En la figura 4.10 se muestran los perfiles de altura de las rutas finales del caso de estudio 2. La longitud promedio de las rutas es de 120 km. Los tramos de ruta de los clústeres se posicionaron a niveles de altura lo cual demuestra diversidad de alternativas para la selección.

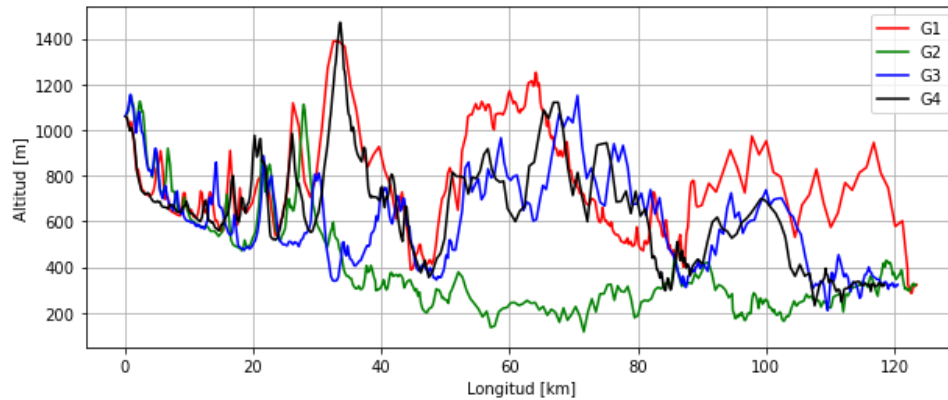


Figura 4.10: Perfil de alturas del caso de estudio 2.

4.2.3. Discusión

A continuación, se presenta la discusión de los resultados del caso de estudio 2, que contemplan consideración de carácter cualitativo en función de la geografía del terreno y del perfil de las rutas finales. Por lo tanto, se establecieron secciones (A y B) dentro del área de estudio que permitieron establecer las características de las distintas rutas que puedan ser de interés para la selección.

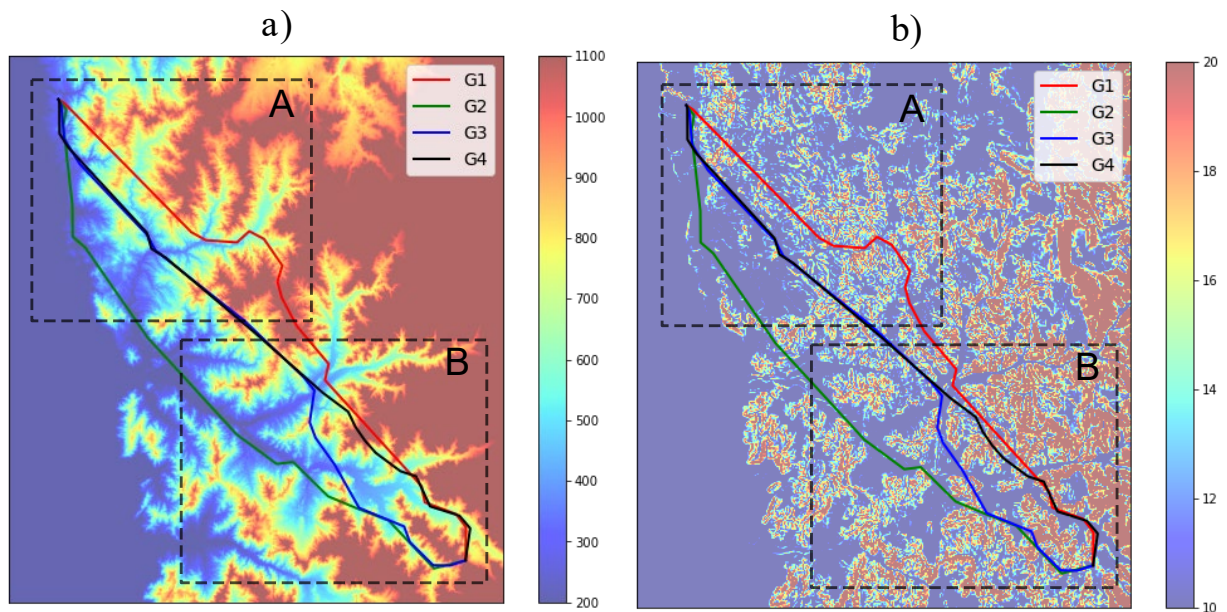


Figura 4.11: Rutas finales del caso de estudio 2. (a) Mapa ráster de elevación del terreno, expresado en m.s.n.m. (b) Mapa ráster de pendientes del terreno, expresado en grados.

En la ruta G1 (rojo) se tuvo una priorización social alta en las secciones A y B, ya que no considera mayormente la topografía del terreno para alcanzar el destino, por lo tanto, tiene mayores cambios de elevación. Además, esta ruta tomó en consideración los tramos de carretera (menor impacto social) que se presentan dentro de la trayectoria. Por otro lado, todas las trayectorias en el mapa contienen ángulos de pendiente menores a 10° .

La ruta G2 (verde) demostró una alta preferencia a las zonas planas, por lo tanto, la variación en el perfil de altura es mínima. Adicionalmente, dentro de la sección A, se posicionó en un tramo grande de carretera que contiene inclinaciones menores a 10° , y se posicionó en forma paralela a la costa del océano debido a que esa zona es más aplanada.

En la sección A, la ruta G3 (azul) evitó de manera efectiva las zonas urbanas y parques nacionales, y tiene una preferencia media entre la priorización de los criterios sociales y los criterios técnicos. Por lo tanto, se obtuvieron tramos de línea donde influye poco la topografía del terreno y donde predominaron los criterios socio-ambientales. Por otro lado, en la sección B existe una preferencia a la topografía, lo cual contribuyó a posicionarse en áreas planas.

En la sección A, la ruta G4 (negro) evitó cruzar las zonas residenciales y parques nacionales y tiene una preferencia media entre la priorización de los criterios sociales y los criterios técnicos. Por lo tanto, hay tramos donde influyó poco la topografía del terreno. En la sección B, la ruta G4 demostró preferencia a considerar la topografía, por lo tanto, se desplaza utilizando áreas de mayor altitud y combina con la minimización de pendientes, lo cual la posiciona por debajo de la altura del perfil de G1 y sobre la altura del perfil de G3.

4.3. Caso de estudio 3: Copiapó

4.3.1. Datos de entrada

Se presenta un caso de estudio para la zona localizada en Copiapó, perteneciente a la región de Atacama. En este caso se necesita realizar la instalación de una línea de transmisión, desde la subestación de origen, S/E1(466503E, 7027870N), hasta la subestación de destino, S/E2(493079E, 6988908N). La longitud aproximada entre las dos subestaciones es de 47 km. Además, el rectángulo que describe el área de estudio tiene una dimensión de 30x43 km. En el área seleccionada para el caso de estudio, donde se ubica la línea de transmisión, se destacan criterios socio-ambientales, como comunidad indígena, carretera principal, parques nacionales, salar y zona Ramsar. Estos criterios son primordiales debido a que implica que atravesar con la línea de transmisión esas áreas subiría la ponderación valorada, por lo tanto, el algoritmo de optimización es quien se encarga de la toma de decisión de atravesar o no las zonas designadas. La figura 4.12 muestra el detalle de las zonas de carácter prohibitivo en el área de estudio.

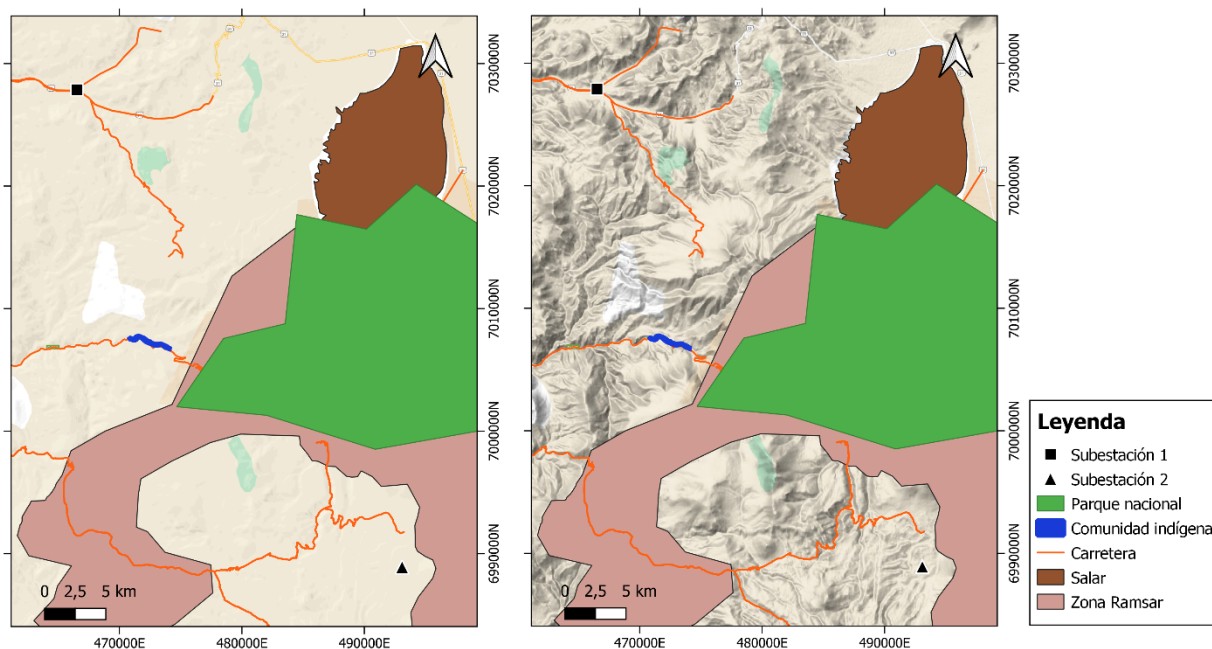


Figura 4.12: Área del caso de estudio 3.

4.3.2. Resultados

La figura 4.13 muestra las rutas finales encontradas luego de la aplicación de la metodología propuesta. Se obtuvieron 5 rutas que destacan variedad dentro del área de estudio. Para el proceso de suavizado se utilizó el tamaño de 50x50 m para las celdas, lo cual aportó en la adquisición de rutas con buena definición de datos. Con las rutas encontradas; además, el búfer de 250 m de ancho fue utilizado para el suavizado de las rutas finales.

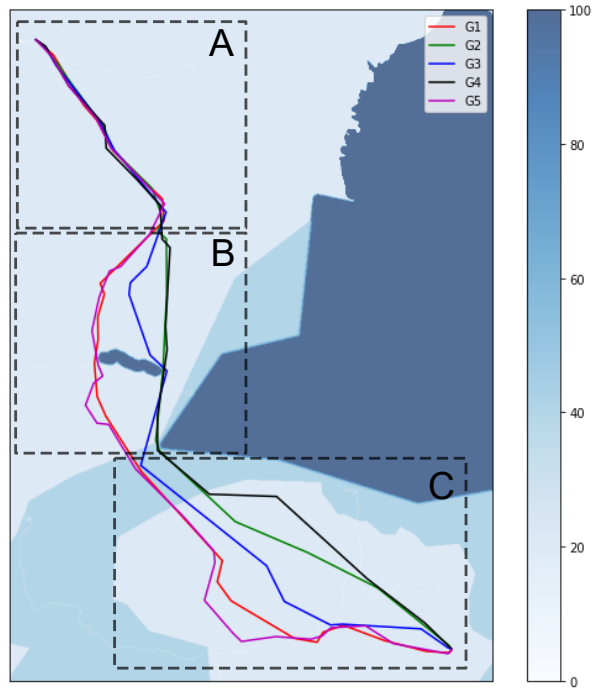


Figura 4.13: Rutas finales del caso de estudio 3 en el mapa ráster de criterios socio-ambientales.

En la figura 4.14 se muestran los perfiles de altura de las 5 rutas finales resultantes del caso de estudio 3. La longitud promedio de las rutas finales es de 60 km.

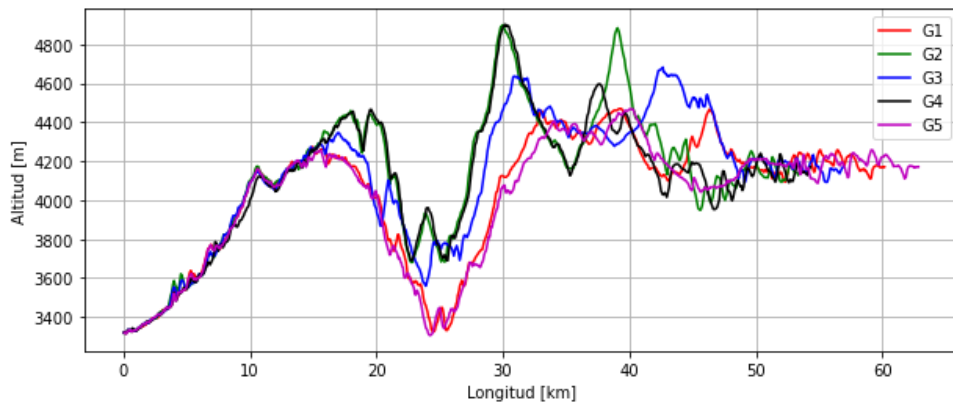


Figura 4.14: Perfil de alturas del caso de estudio 3.

La tabla 4.1 muestra la matriz de evaluación de ponderaciones de las rutas, cada ruta fue evaluada desde el punto de vista de las demás FO recíprocas. Cada FO está asociada a un conjunto de parámetros que ayudan a realizar la combinación entre los criterios socio-ambientales y técnicos dentro de la función objetivo previo a resolver el problema de optimización. Por lo tanto, para cada FO (en función del conjunto de parámetros combinatorios) existe una ruta óptima asociada.

En relación con lo anterior, cada fila de la matriz contiene una ruta evaluada para distintas FO. De manera recíproca, cada columna contiene la penalización total resultante de evaluar la FO cuando es aplicado a distintas rutas. Como resultado de esta matriz, los datos muestran cómo cambia la ponderación de una de las FO para distintas rutas, es decir, la ruta que es la referencia (óptima) está ubicada en la diagonal principal de la matriz. Por lo tanto, para todas las columnas se dividieron los valores en cada posición para el valor que se encuentra en la diagonal principal de la matriz. En ese sentido, los valores ponderados quedaron expresados en por unidad. Al aplicarse los criterios mínimo-promedio y mínimo-máximo, la ruta G1 es la que representa beneficios valorados frente a las demás alternativas.

| | FO_1 | FO_2 | FO_3 | FO_4 | FO_5 | Mínimo | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| | | | | | | Promedio | Máximo |
| <i>ruta</i> ¹ : G1 | 1.000 | 1.232 | 1.117 | 1.177 | 1.010 | 1.107 | 1.232 |
| <i>ruta</i> ² : G2 | 2.499 | 1.000 | 2.467 | 1.010 | 3.022 | 2.000 | 3.022 |
| <i>ruta</i> ³ : G3 | 2.097 | 1.168 | 1.000 | 1.161 | 3.061 | 1.698 | 3.061 |
| <i>ruta</i> ⁴ : G4 | 1.973 | 1.008 | 1.961 | 1.000 | 2.345 | 1.657 | 2.345 |
| <i>ruta</i> ⁵ : G5 | 1.025 | 1.305 | 1.198 | 1.245 | 1.000 | 1.155 | 1.305 |

Tabla 4.1: Matriz de evaluación de ponderaciones del caso de estudio 3, para la aplicación de criterios de selección mínimo-promedio y mínimo-máximo.

4.3.3. Discusión

A continuación, se presenta la discusión de los resultados del caso de estudio 3, cuyas observaciones son de carácter cualitativo en función de los criterios socio-ambientales y técnicos del terreno, este último es considerado en conjunto con el perfil de las rutas finales. Por lo tanto, se establecieron secciones (A, B y C) dentro del área de estudio que permitieron establecer las características de las distintas rutas. Por otro lado, también se incluyen las observaciones asociadas a la matriz de evaluación. A continuación, se presentan las características de las rutas dentro de las secciones consideradas:

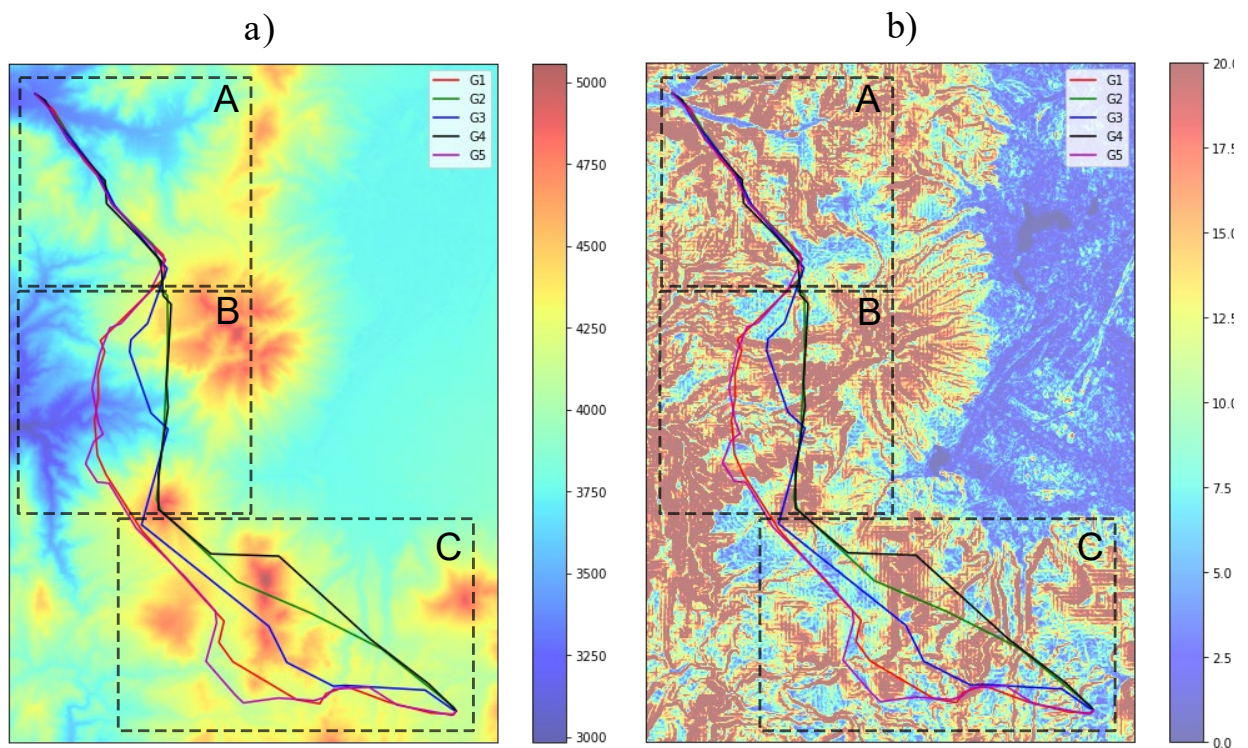


Figura 4.15: Rutas finales del caso de estudio 3. (a) Mapa ráster de elevación del terreno, expresado en m.s.n.m. (b) Mapa ráster de pendientes del terreno, expresado en grados.

Sección A

Las rutas G1 (rojo), G2 (verde), G3 (azul), G4 (negro) y G5 (violeta) utilizaron la carretera como principal posicionamiento de la ruta, además, el tramo de carretera contiene pendientes menores a los 10° de inclinación. Se considera que 10° es el ángulo máximo para que los materiales puedan ser transportados fácilmente mediante vía terrestre al sitio de construcción. Por lo tanto, se impone la preferencia social, donde la topografía no aporta significativamente prohibiciones.

Sección B

Las rutas G2 (verde) y G4 (negro), se ubican al costado derecho de la comunidad indígena de la zona. Por lo tanto, las 2 rutas tienen una mayor preferencia social debido a que su trayectoria es rectilínea y no se ve afectada por el impacto que puede producir los factores topográficos asociados a la altura y pendiente del terreno. Además, estas dos rutas son las rutas más cortas entre todas para llegar al destino.

Las rutas G1 (rojo) y G5 (violeta) se ubicaron al costado izquierdo de la comunidad indígena. Además, estas rutas tuvieron mayor preferencia en la minimización de las pendientes por lo tanto la ruta se posicionó de manera zigzag en el enrutamiento. En ese sentido, se pudo apreciar que también tiene parcialmente tendencia a minimizar los cambios de altura, lo cual genera una leve diferencia entre estas dos rutas.

En la ruta G3 (azul) se obtuvo una preferencia por minimizar los cambios de altitud, por lo tanto, en su perfil de altura se tuvo una zona más aplanada. Además, la ruta tuvo una participación moderada para minimizar las pendientes del terreno en su trayectoria, lo cual ayuda a la ruta a desplazarse hacia zonas más planas. Con respecto al criterio social, la ruta evita cruzar las zonas prohibitivas, y se posiciona entre los dos grupos de ruta mencionados anteriormente.

Sección C

Las rutas G1 (rojo) y G4 (violeta) tuvieron una mayor preferencia a minimizar las pendientes, por lo tanto, las rutas se posicionaron en una zona más plana. La ruta G1 demostró tendencia a ir por zonas con mayor elevación. Por otro lado, la ruta G5 utilizó un tramo de carretera, lo cual le otorgó una preferencia social media en comparación con la ruta G1.

En la ruta G3 (azul) la minimización de los cambios de altura estuvo presente, además, tuvo cierta combinación con la minimización de pendientes. Por lo tanto, tiende a bordear las bases de las montañas con un nivel prudente de variación de altura.

Las rutas G2 (verde) y G4 (negro) tuvieron una mayor preferencia social debido a que su trayectoria es rectilínea y fue afectada de manera minoritaria por los factores de altura y pendiente del terreno. En esta sección de área, el tramo de la línea tiene menor longitud en comparación con los otros clústeres. La ruta G2 cruzó las zonas más elevadas de las montañas, lo cual demostró la falta de la influencia de la topografía en este tramo de línea.

Matriz de evaluación

En relación con la matriz de evaluación de ponderaciones y los criterios de selección, el valor de cada ruta dependerá de la configuración de los parámetros introducidos en la función objetivo antes de resolver el problema de optimización. Es importante mencionar que cualquier cambio de los parámetros puede implicar cambios en la ruta. Por este motivo, al realizar el proceso de suavizado, el valor de las rutas finales respecto a las iniciales se incrementa desde 10 hasta el 20%. Esto es gracias a las rectilíneas de la versión suave (versión subóptima) que atraviesan áreas cercanas a la trayectoria inicial (versión óptima). Sin embargo, la versión suave es válida por su aplicación realística dentro del trazado y por su semejanza respecto a la ruta guía.

Al aplicarse los criterios económicos de mínimo-promedio y mínimo-máximo se pudo observar que ambos criterios tienden a seleccionar la misma ruta, de esta manera, se indica que la ruta presenta beneficios para ambos criterios. Sin embargo, dependiendo de la distribución espacial y las ponderaciones de los criterios en los cuales se acerque o atravesase la línea de transmisión esta selección puede encajonarse entre dos rutas distintas, que presentarán su beneficio frente a las demás según su criterio correspondiente.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

En este trabajo se propuso un modelo del problema de optimización, el cual combinó parámetros ponderados, asociados a los criterios de interés socio-ambientales y técnicos (topografía). Para el desarrollo, los datos de zonas prohibitivas asociadas al mapa fueron considerados a través de imágenes rasterizadas. Los rásteres, mediante su estructura de cuadrícula de sus celdas, permitieron establecer un grafo dirigido conformado por nodos y enlaces (tramos de líneas de transmisión). Por lo tanto, los nodos y tramos de línea estuvieron asociados directamente a la ponderación asignada a las características del uso del terreno para resolver el problema de optimización. Para encontrar la solución al problema de enrutamiento, el algoritmo de Dijkstra fue aplicado, el cual resolvió el problema de manera eficiente. Como resultado, se obtuvo un conjunto de rutas distintas, cada una de ellas formadas por nodos consecutivos interconectados para representar la línea de transmisión. En ese sentido, cada ruta del conjunto de alternativas se asoció a una combinación de parámetros en particular, lo cual contribuyó a generar la diversidad entre ellas. Por otro lado, las rutas que tuvieron similitud en su geoposicionamiento fueron abordadas mediante el proceso de clusterización para identificarlas según sus similitudes; después de encontrar las rutas centroides que representen distintivamente. La ruta representativa de cada clúster fue sometida al proceso de suavizado para obtener una versión de ruta guía formada por rectilíneas, lo cual fue útil para reducir el zigzagado y contribuir hacia una aproximación más realista de la ruta de línea de transmisión; es decir, la ruta se ajusta de mejor manera a los criterios técnicos de construcción de la obra.

De acuerdo con las soluciones obtenidas en cada uno de los casos de estudio, las rutas de líneas de transmisión evitaron de manera efectiva cruzar zonas de carácter prohibitivo, las cuales son de interés social, cultural, ambiental. Por otro lado, el nivel de importancia asignado tanto a los criterios socio-ambientales como a los criterios técnicos, promovió la diversificación del posicionamiento geográfico del trazado de las líneas. Por lo tanto, las alternativas de ruta adquiridas contienen tramos de línea donde se priorizaron aspectos que pueden ser de interés alguno para las partes interesadas dentro de la toma de decisiones.

Adicionalmente, las rutas fueron evaluadas desde el punto de vista de otras funciones objetivo, generándose la matriz de evaluación de ponderaciones. En ese sentido, se consideraron los criterios mínimo-promedio y mínimo-máximo para la selección de rutas, como soporte en la toma de decisiones. Por lo tanto, los dos criterios permitieron seleccionar la ruta representativa de cada clúster. Adicionalmente, estos criterios de selección se utilizaron para escoger aquella ruta que presenta más beneficios desde el punto de vista de otras rutas evaluadas. Por otro lado, la ruta de mayor beneficio según estos criterios no necesariamente representa una decisión final; no obstante, cualquiera de las demás opciones de ruta son alternativas válidas motivo que fueron encontradas bajo optimalidad, y que en igual manera contribuyeron a la diversidad de propuestas para la selección.

5.2. Trabajo futuro

Luego de evaluar los casos de estudio planteados se pudo evidenciar el beneficio de tener alternativas de ruta que ayudan a atrapar el interés de los tomadores de decisiones. Sin embargo, en esta aplicación se podría considerar la integración de decisiones asociadas con la optimización angular, que permitiría reducir o eliminar los ángulos de deflexión o curvas pronunciados a lo largo del trazado final de la ruta. En ese sentido, la solución al problema de la optimización angular puede ser incluida dentro del algoritmo de Dijkstra. El método Dijkstra se basa en Programación Dinámica y mediante una versión modificada se podría considerar este nuevo criterio. Por lo tanto, esta técnica de optimización podría contribuir a la reducción de costos de implantación y construcción del proyecto al reducir el uso de torres angulares. Las torres angulares para soportar trayectorias pronunciadas requieren mayor robustez mecánica, lo que contribuye a que la estructura sea significativamente más costosa con respecto a los otros tipos de torres de transmisión.

Por otro lado, se plantea la incorporación del algoritmo de Optimum Spotting, el cual se basa en Programación Dinámica para definir la posición ideal de las torres dentro de la ruta guía. De esta manera, se definirán las distancias, tipos de torres y los parámetros de los conductores adecuados para la línea de transmisión dentro del terreno, con el propósito de cumplir las normativas y requerimientos estructurales establecidos a través de los criterios del diseño y de los expertos. Además, con la optimización del posicionamiento de torres, se reconocerá de una mejor manera los criterios técnicos del diseño, lo que permitirá planificar eficientemente la construcción de la obra, prevenir errores y costos adicionales que se pudieran producir con respecto a que si este mismo proceso de posicionamiento fuere realizado manualmente.

Bibliografia

- [1] L. A. Fernandez-Jimenez *et al.*, “High voltage overhead power line routing under an objective observability criterion,” *Energies*, vol. 10, no. 10, Oct. 2017. doi: 10.3390/en10101576.
- [2] T. S. Kishore and S. K. Singal, “Optimal economic planning of power transmission lines: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 949–974, Nov. 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.125.
- [3] A. H. M. Santos *et al.*, “Optimizing routing and tower spotting of electricity transmission lines: An integration of geographical data and engineering aspects into decision-making,” *Electric Power Systems Research*, vol. 176, p. 105953, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105953.
- [4] P. Y. Ekel, A. C. Lisboa, J. G. Pereira, D. A. G. Vieira, L. M. L. Silva, and M. F. S. V. D’Angelo, “Two-stage multicriteria georeferenced express analysis of new electric transmission line projects,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 108, pp. 415–431, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.01.008.
- [5] S. Demircan, M. Aydin, and S. S. Durduran, “Finding optimum route of electrical energy transmission line using multi-criteria with Q-learning,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 3477–3482, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.08.135.
- [6] H. Eroğlu and M. Aydin, “Optimization of electrical power transmission lines’ routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 23, no. 5, pp. 1418–1430, Jan. 2015. doi: 10.3906/elk-1211-59.
- [7] V. M. Gonçalves, E. M. Baptista Bolonhez, G. E. Mendes Campos, and L. H. Sathler, “Transmission line routing optimization using rapid random trees,” *Electric Power Systems Research*, vol. 194, p. 107096, May 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107096.
- [8] J. Shu, L. Wu, Z. Li, M. Shahidehpour, L. Zhang, and B. Han, “A new method for spatial power network planning in complicated environments,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 381–389, Feb. 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2161351.
- [9] G. O. S. Medeiros *et al.*, “Transmission towers spotting in power systems considering engineering and environmental aspects: A dynamic programming approach,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 9, p. e13000, Sep. 2021, doi: 10.1002/2050-7038.13000.
- [10] S. Ghandehari Shandiz, G. Doluweera, W. D. Rosehart, L. Behjat, and J. A. Bergerson, “Investigation of different methods to generate Power Transmission Line routes,” *Electric Power Systems Research*, vol. 165, pp. 110–119, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.08.012.

- [11] C. Monteiro, I. J. Ramírez-Rosado, V. Miranda, P. J. Zorzano-Santamaría, E. García-Garrido, and L. A. Fernández-Jiménez, “GIS spatial analysis applied to electric line routing optimization,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 934–942, Apr. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839724.
- [12] Ministerio de Energía de Chile, “Estudio para la implementación del proceso de determinación de franjas preliminares,” May 2018. [Online]. Available: <https://energia.gob.cl/metodologia-de-los-estudios-de-franjas>
- [13] EPRI, “EPRI-GTC Overhead electric transmission line siting methodology.” Palo Alto, California, p. 198, Feb. 2006.
- [14] R. Araneo, S. Celozzi, and C. Vergine, “Eco-sustainable routing of power lines for the connection of renewable energy plants to the Italian high-voltage grid,” *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 9–19, 2015, doi: 10.1007/s40095-014-0143-z.
- [15] K. Bevanger *et al.*, “Optimal design and routing of power lines; ecological, technical and economic perspectives (OPTIPOL).” Norwegian Institute for Nature Research, Trondheim, 2014.
- [16] National Grid, “Our Approach to the Design and Routeing of New Electricity Transmission Lines.” Warwick, UK, 2012.
- [17] Ministerio de Energía de Chile, “Establece un nuevo Sistema De Transmisión Eléctrica y crea un organismo Coordinador Independiente del Sistema Eléctrico Nacional.” Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Chile, 2016.
- [18] Ministerio de Energía de Chile, “Estudios de Franjas,” 2021. [Online]. Available: <https://franjas.minenergia.cl/que-son-los-estudios-de-franjas>
- [19] Y. Li, Q. Yang, W. Sima, J. Li, and T. Yuan, “Optimization of transmission-line route based on lightning incidence reported by the lightning location system,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1460–1468, Jul. 2013. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2256473.
- [20] S. Bagli, D. Geneletti, and F. Orsi, “Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts,” *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 31, no. 3, pp. 234–239, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.eiar.2010.10.003.
- [21] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische Mathematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, Dec. 1959. doi: 10.1007/BF01386390.
- [22] “QGIS - Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto,” 2020. [Online]. Available: <https://www.qgis.org/es/site/>
- [23] “Python Release Python 3.9.7,” 2021. [Online]. Available: <https://www.python.org/>
- [24] Ministerio de Bienes Nacionales, “Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile,” 2021.

- [Online]. Available: <https://www.ide.cl/>
- [25] “OpenStreetMap Project,” 2020. [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org/>
- [26] “EarthExplorer,” 2021. [Online]. Available: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [27] “United States Geological Survey (USGS),” 2021. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/>
- [28] F. Kiessling, P. Nefzger, and J. F. Nolasco, *Overhead power lines: Planning, design, construction*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. [Online]. Available: www.springer.de/engine/
- [29] N. Piveteau, “A novel approach to the routing problem of overhead transmission Lines,” Master’s thesis, University of Zurich, Zurich, 2017.
- [30] “The Julia Programming Language,” 2020. [Online]. Available: <https://julialang.org/>
- [31] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep residual learning for image recognition,” *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 770–778, Dec. 2016. doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [32] R. Nainggolan, R. Perangin-Angin, E. Simarmata, and A. F. Tarigan, “Improved the performance of the K-Means cluster using the Sum of Squared Error (SSE) optimized by using the Elbow Method,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1361, no. 1, Nov. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1361/1/012015.
- [33] J. D. Gammell, S. S. Srinivasa, and T. D. Barfoot, “Informed RRT*: Optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic,” *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2997–3004, Sep. 2014. doi: 10.1109/IROS.2014.6942976.
- [34] Comisión Nacional de Energía, “Expansión de la Transmisión,” 2021. [Online]. Available: <https://www.cne.cl/tarificacion/electrica/>

Anexos

Anexos A

Formulación del problema del camino más corto

Con el propósito de resolver este problema, se tiene un grafo dirigido $G(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ cuyas aristas son la base de la representación del set de nodos $\mathcal{N} = (v_1, \dots, v_n)$, el set aristas \mathcal{E} se obtiene mediante las conexiones entre cada nodo v_i con todos los nodos adyacentes y son la representación de los tramos de línea de transmisión. La función objetivo (A.1) contiene la ponderación total mediante las sumatoria de todos los enlaces (i, j) que cumplen con las restricciones del modelo.

$$w_{Total} = \underset{x_{ij}}{\text{mín}} \sum_i \sum_j w_{ij} \cdot x_{ij} \quad (\text{A.1})$$

Sujeto a:

$$\sum_j x_{sj} - \sum_j x_{js} = 1 \quad (\text{A.2})$$

$$\sum_j x_{tj} - \sum_j x_{jt} = -1 \quad (\text{A.3})$$

$$\sum_j x_{ij} - \sum_j x_{ji} = 0, \forall i \in \mathcal{N} / \{s, t\} = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$x_{ij} \geq 0; \forall (j, i) \in \mathcal{E} \quad (\text{A.5})$$

Donde, las variables de decisión x_{ij} indican si un enlace (i, j) forma parte de la ruta más corta. El objetivo es seleccionar el conjunto de aristas (tramos de línea de transmisión) que forman la ponderación total mínima (w_{Total}) para ir desde el nodo de origen s al nodo receptor t , correspondiente al subconjunto de enlaces que representa la ruta de menor costo para la línea de transmisión. La restricción (A.2) requiere que solo una arista esté activa yendo de s a una arista adyacente, (A.3) requiere que solo una arista llegue al sumidero, (A.4) requiere que como máximo una arista esté activa entre los nodos i y j y (A.5) proporciona no negatividad para las variables de decisión. La ponderación total (w_{Total}) se calcula aplicando el algoritmo de ruta más corta de Dijkstra [21]. El resultado obtenido corresponde al subconjunto del conjunto enlaces \mathcal{E} que representa la ruta de menor complejidad para la línea de transmisión.

Anexo B

Resultados caso de estudio 1: Atacama - Coquimbo

La figura B.1 muestra las rutas finales del caso de estudio 1 geoposicionadas en los mapas de criterios socio-ambientales y de pendiente del terreno. en ese sentido, las rutas fueron analizadas desde el punto de vista de sus funciones objetivo (FO) mediante una matriz de evaluación para determinar la complejidad ponderada de la ruta y, por ende, seleccionar la ruta de menor impacto ponderado frente a las demás alternativas.

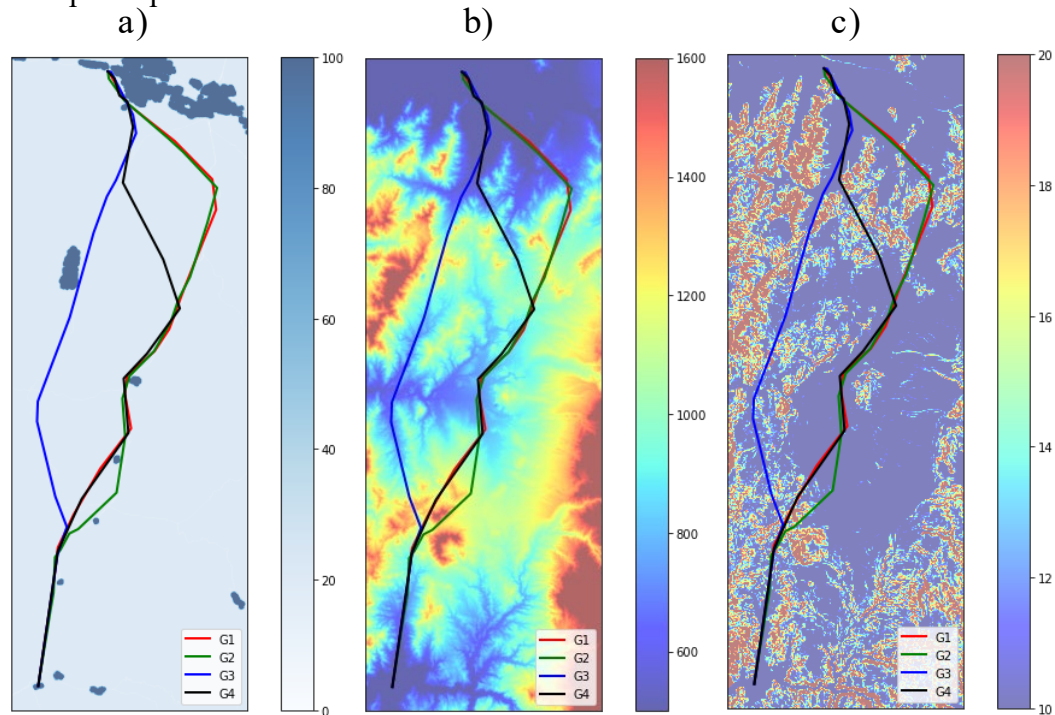


Figura B.1: Rutas finales del caso de estudio 1. (a) Mapa ráster de criterios socio-ambientales. (b) Mapa ráster de elevación del terreno, expresado en m.s.n.m. (c) Mapa ráster de pendiente del terreno, expresado en grados.

La tabla B.1 muestra la matriz de evaluación de ponderaciones asociada a las rutas finales del caso de estudio 1, mostradas en la figura B.1; cada ruta fue evaluada desde el punto de vista de las demás FO recíprocas. En ese sentido, cada FO está asociada a un conjunto de parámetros que ayudan a realizar la combinación entre los criterios socio-ambientales y técnicos dentro de la función objetivo de ponderaciones previo a resolver el problema de optimización. Por lo tanto, cada fila de la matriz contiene una ruta evaluada para distintas FO. De manera recíproca, cada columna contiene el valor resultante de evaluar la FO cuando es aplicado a distintas rutas restantes.

| | FO_1 | FO_2 | FO_3 | FO_4 | Mínimo | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| | | | | | Promedio | Máximo |
| $ruta^1$: G1 | 1.000 | 1.161 | 1.074 | 1.023 | 1.065 | 1.161 |
| $ruta^2$: G2 | 1.289 | 1.000 | 1.251 | 1.362 | 1.226 | 1.362 |
| $ruta^3$: G3 | 1.041 | 1.220 | 1.000 | 1.028 | 1.072 | 1.220 |
| $ruta^4$: G4 | 1.024 | 1.233 | 1.021 | 1.000 | 1.070 | 1.233 |

Tabla B.1: Matriz de evaluación del caso de estudio 1, para la aplicación de criterios de selección mínimo-promedio y mínimo-máximo.

Como resultado de esta matriz, los datos muestran el cambio de la ponderación total de una FO para distintas rutas; es decir, la ruta que es la referencia (óptima) está ubicada en la diagonal principal de la matriz. En ese sentido, para todas las columnas se dividió el valor de cada posición para el valor que se encuentra en la diagonal principal de la matriz. Por lo tanto, los valores de costo quedaron expresados en por unidad. Al aplicarse los criterios mínimo-promedio y mínimo-máximo, la ruta G1 es la que presenta beneficios en ponderación frente a las demás alternativas. De esta manera, la métrica que permite seleccionar la ruta representativa bajo los criterios antes mencionados. Además, las rutas en sí fueron calculadas mediante el cumplimiento de optimalidad, y cualquier opción de ruta puede ser un buen candidato según el criterio que los tomadores de decisiones consideren.

Resultados caso de estudio 2: Coquimbo

La figura B.2 muestra los 104 perfiles de altura asociados a los 4 clústeres de rutas. La longitud promedio de las rutas es aproximadamente 120 km; además, su perfil de altura cambia según la topografía dependiendo del lugar geográfico que cada tramo de línea atraviesa.

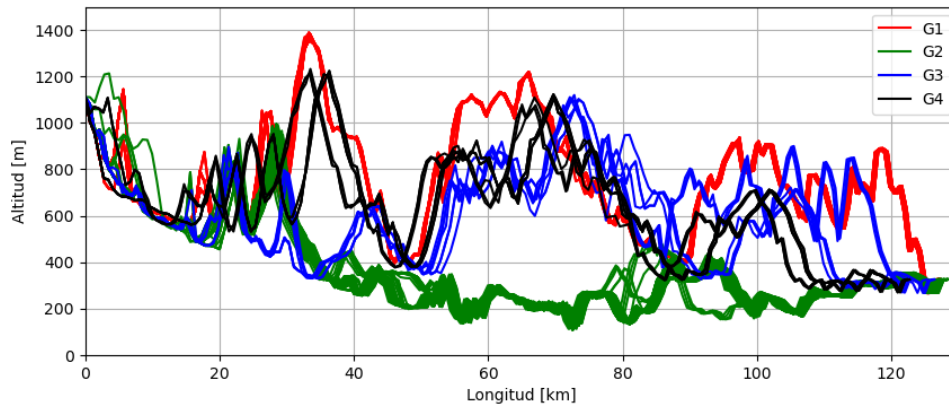


Figura B.2: Perfiles de altura del set de rutas clusterizadas del caso de estudio 2.

En relación con lo anterior, por cada clúster se obtuvo una ruta que contiene las características geográficas, y que presente beneficios respecto a las demás alternativas dentro del mismo clúster, es decir, una ruta centroide que represente al clúster. En ese sentido, la

figura B.3 muestra la ruta representativa encontrada por clúster, luego de aplicar los criterios de selección mínimo-promedio y mínimo-máximo.

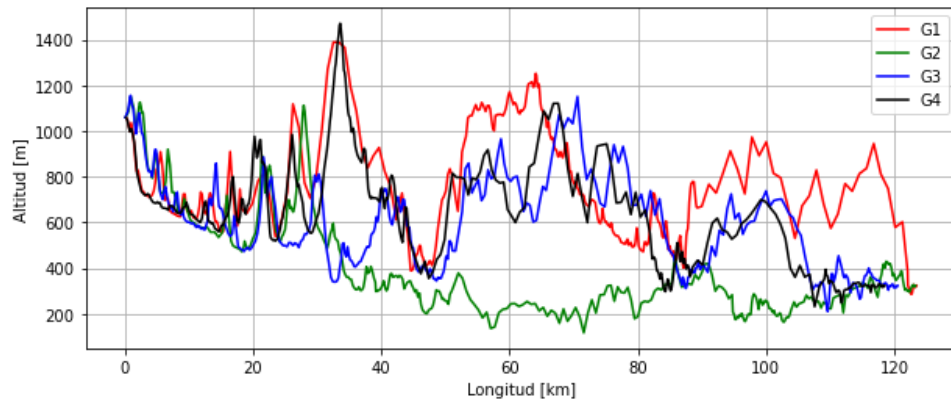


Figura B.3: Perfil de alturas del caso de estudio 2.

La figura B.4 muestra las etapas desarrolladas del proceso de suavizado de la trayectoria; para realizar este proceso, las rutas fueron establecidas mediante la utilización de rásteres con resolución 200x200 m. La figura B.4a contiene las rutas iniciales, las cuales presentaron zigzaguo en sus trayectorias. Consecuentemente, la figura B.4b ilustra el búfer de 800 m creado alrededor de las rutas guía de la figura B.4a, con el propósito de brindar el espacio necesario para crear una trayectoria utilizando tramos rectilíneos. Después, la búsqueda de los puntos vértices se realizó utilizando el algoritmo de RRT*. En la figura B.4c se establecen las rutas finales resultantes del proceso de suavizado, donde cada ruta está formada por tramos rectilíneos.

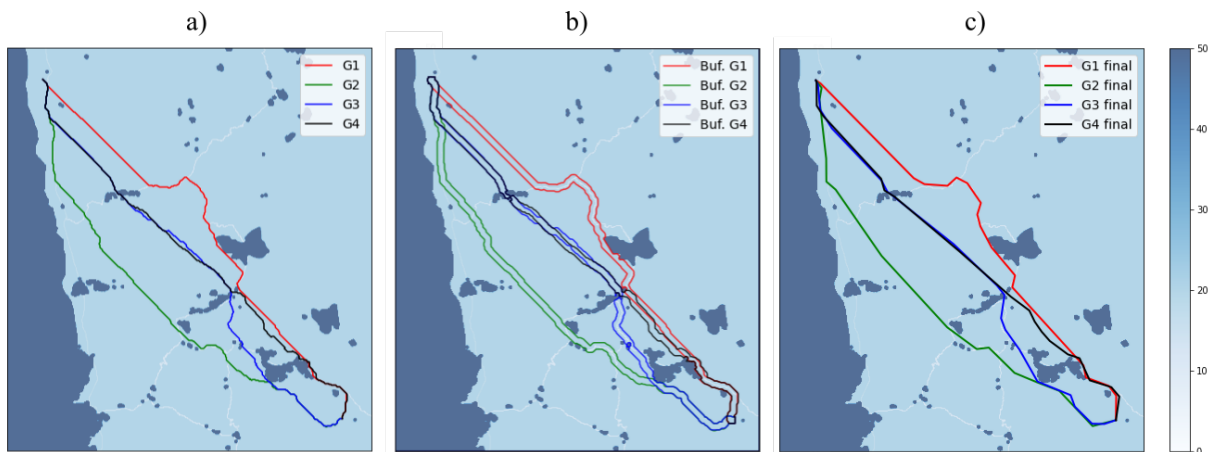


Figura B.4: Etapas de los clústeres de rutas del caso de estudio 2. (a) Rutas iniciales. (b) Búfer de las rutas. (c) Rutas suavizadas.

En la figura B.5 se muestran los perfiles de altura de las rutas originales encontradas (representadas con líneas segmentadas), junto con los perfiles de altura de las rutas finales suavizadas de cada uno de los clústeres. Las rutas finales alcanzaron una menor longitud total

de línea de transmisión con respecto a la ruta original debido al proceso de reducción del zigzagueo ejecutado.

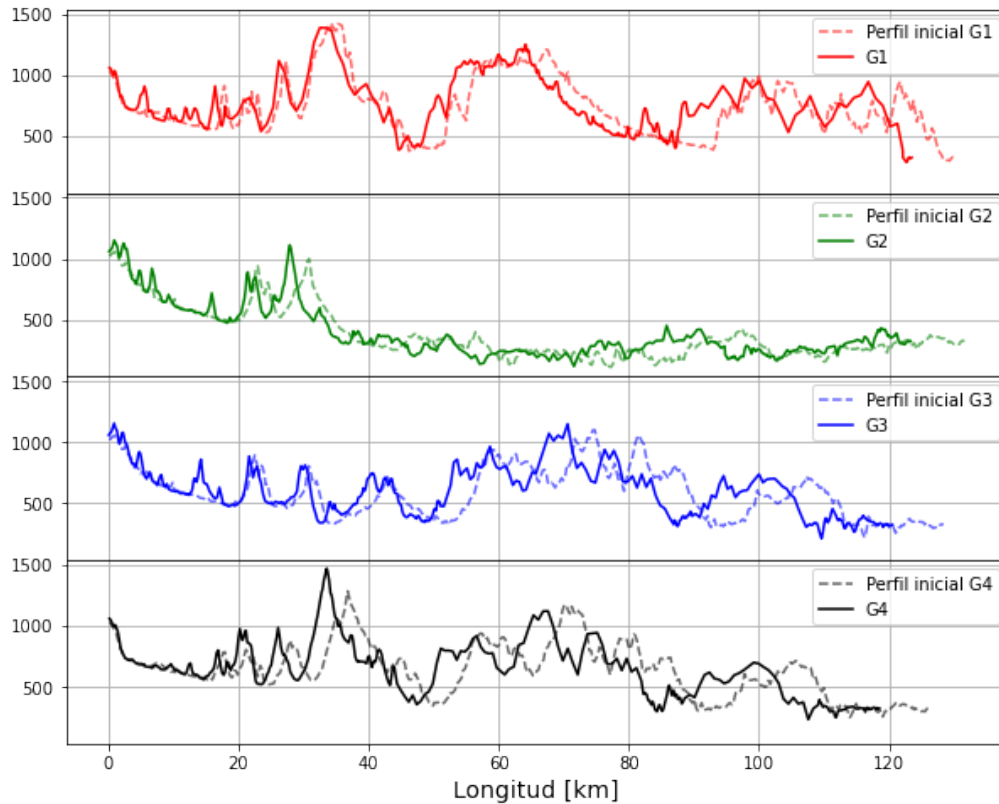


Figura B.5: Perfiles de altura del caso de estudio 2, rutas iniciales vs suavizadas.

La tabla B.2 muestra la matriz de evaluación de ponderaciones, que se asocia a las rutas finales, luego de evaluarse desde el punto de vista de las demás FO recíprocas. Al aplicarse los criterios mínimo-promedio y mínimo-máximo, la ruta G3 es la que representa beneficios frente a las demás alternativas.

| | FO_1 | FO_2 | FO_3 | FO_4 | Mínimo | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| | | | | | Promedio | Máximo |
| <i>ruta</i> ¹ : G1 | 1.000 | 1.407 | 1.198 | 1.232 | 1.209 | 1.407 |
| <i>ruta</i> ² : G2 | 1.108 | 1.000 | 1.011 | 1.060 | 1.045 | 1.108 |
| <i>ruta</i> ³ : G3 | 1.078 | 1.039 | 1.000 | 1.061 | 1.044 | 1.078 |
| <i>ruta</i> ⁴ : G4 | 1.084 | 1.152 | 1.051 | 1.000 | 1.071 | 1.152 |

Tabla B.2: Matriz de evaluación del caso de estudio 2, para la aplicación de criterios de selección mínimo-promedio y mínimo-máximo.

Resultados caso de estudio 3: Copiapó

La figura B.6 ilustra las etapas del proceso de suavizado de las rutas, desde la ruta original hasta la ruta final conformada por tramos rectilíneos

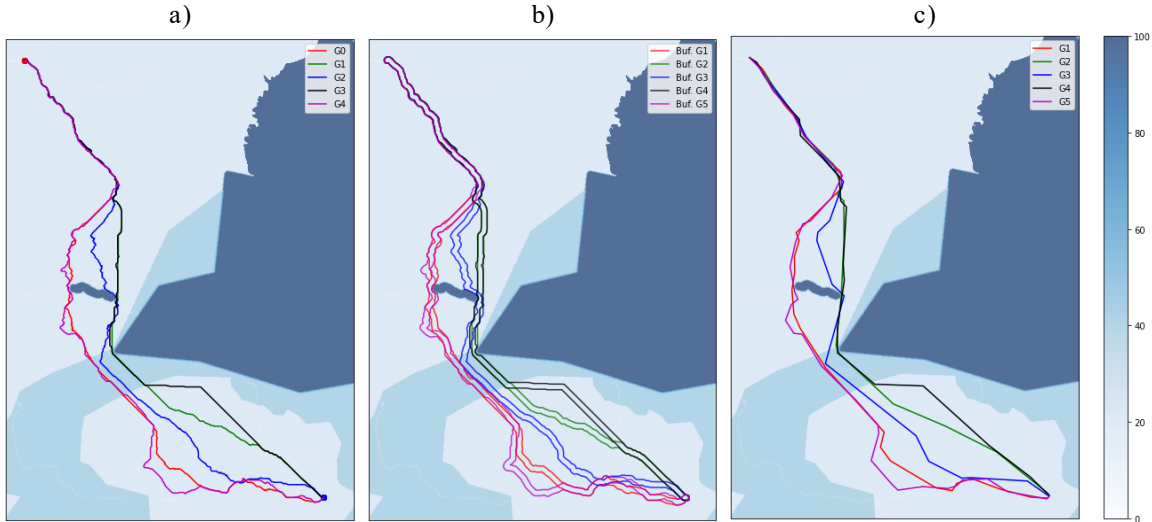


Figura B.6: Etapas de los clústeres de rutas del caso de estudio 3. (a) Rutas iniciales. (b) Búfer de las rutas. (c) Rutas suavizadas.

En relación con lo anterior, la figura B.7 muestra los 90 perfiles de altura asociados a los 5 clústeres encontrados. La longitud promedio de las rutas es aproximadamente 60 km. Además, sus perfiles de altura mostraron una diversidad de alternativas que cambian según la topografía del terreno, lo cual contribuye junto a la geografía, para brindar un menú de opciones de potencial interés según las consideraciones sobre el uso del suelo por parte de los tomadores de decisiones.

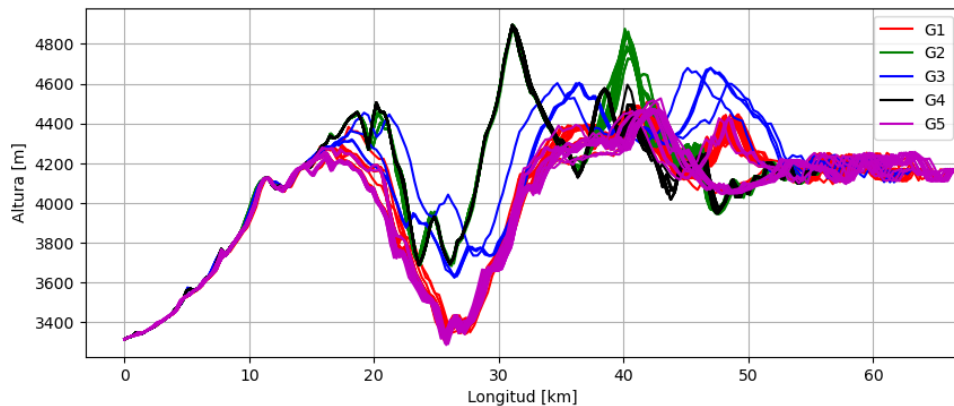


Figura B.7: Perfiles de altura del set de rutas clusterizadas del caso de estudio 3.

La figura B.8 muestra las rutas representativas por cada clúster luego de aplicar los criterios de selección mínimo-promedio y mínimo-máximo. Como se menciono anteriormente, estos

criterios contribuyen a la seleccionar la ruta con menor impacto frente a las demás alternativas dentro cada clúster.

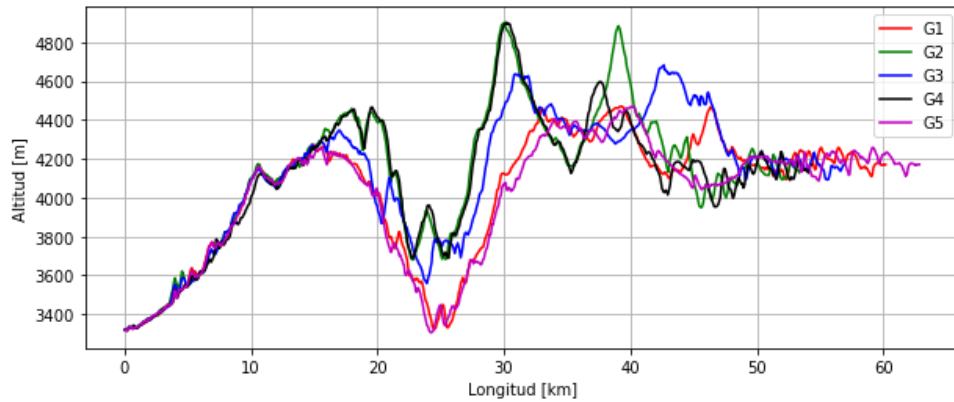


Figura B.8: Perfil de alturas del caso de estudio 3.

Finalmente, los perfiles de altura asociados a las rutas finales (suavizadas) se muestran juntamente con los perfiles de las rutas iniciales de cada clúster, como se muestran en la figura B.9.

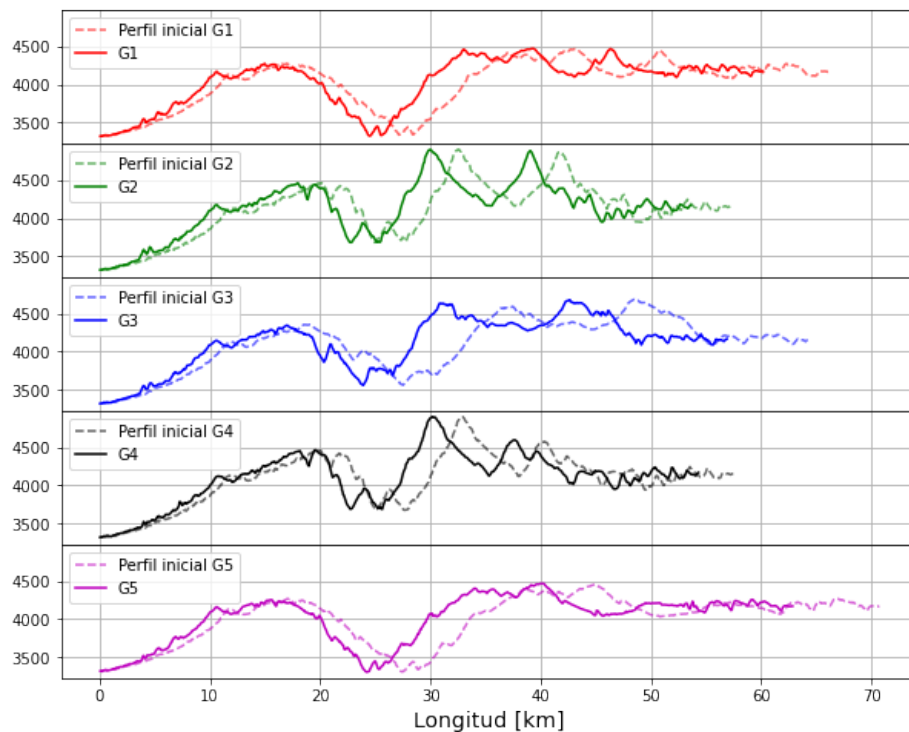


Figura B.9: Perfiles de altura del caso de estudio 3, rutas iniciales vs suavizadas.