

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA GEOGRÁFICA



**OPTIMIZACIÓN AMBIENTAL DEL DISEÑO DE LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

RODRIGO ALEJANDRO VEGA TRIPAILAF

Profesor Guía: Mag. Marcos Medina Tapia

Tesis de Grado presentada en conformidad a los requisitos para obtener el
Grado de Magíster en Medio Ambiente mención Gestión y Planificación
Ambiental del Territorio

Santiago, Chile
2013

© Rodrigo Alejandro Vega Tripailaf

“Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento”.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO INGENIERÍA GEOGRÁFICA



OPTIMIZACIÓN AMBIENTAL DEL DISEÑO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

RODRIGO ALEJANDRO VEGA TRIPAILAF

Comisión Integrada por los profesores:

Profesor Guía:

Mag. Marcos Medina Tapia

Profesores de la Comisión:

- Fernando Corvalán Quiroz

- Gonzálo Galeas Figueroa

Tesis de Grado presentada en conformidad a los requisitos para obtener el
Grado de Magíster en Medio Ambiente mención Gestión y Planificación
Ambiental del Territorio

Santiago, Chile

2013

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi profesor Guía Marcos Medina por su tiempo y dedicación, a los profesores del magister por sus conocimientos, a los profesionales de Transelec por su valioso tiempo, a mis compañeros del Magíster por su grata compañía, a mis padres por su comprensión y a mi hijo por todo su amor.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema.....	1
1.3. Hipótesis	5
1.3.1. Hipótesis general.....	5
1.3.2. Hipótesis específicas	5
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. Estructura del documento	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Técnicas de generación de alternativas de localización.....	9
2.1.1 Elaboración de mapas temáticos.....	9
2.2 Análisis Multiobjetivo	20
2.2.1 Análisis Multiobjetivo Difuso (AMOD)	21
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA OPTIMIZACIÓN AMBIENTAL DE TRAZADOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA.	22
3.1 Recopilación de información del área de estudio	25
3.2 Normalización de la información geográfica	26
3.3 Valoración de capas de información ambiental.....	27
3.4 Suma de capas de información por dimensión ambiental	28
3.5 Asignación de pesos específicos a las dimensiones ambientales	30
3.5.1 Método Delphi.....	30
3.6 Suma de dimensiones ambientales	32
3.7 Determinación de matriz de costos acumulados.....	32
3.8 Cálculo de ruta de menor costo acumulado	34
CAPITULO IV: DESARROLLO Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	35

4.1	Recopilación de información del área de estudio	35
4.1.1	Características del área de estudio	35
4.1.2	Descripción del proyecto a analizar	36
4.1.3	Aspectos ambientales, sociales y territoriales del área de estudio	37
4.1.4	Visita a terreno.....	44
4.2	Normalización de la información geográfica.....	47
4.3	Valoración de capas de información ambiental.....	50
4.4	Suma de capas de información por dimensión ambiental	60
4.5	Asignación de pesos específicos a las dimensiones ambientales	62
4.6	Suma de dimensiones ambientales	65
4.7	Determinación de matriz de costos acumulados.....	66
4.8	Cálculo de ruta de menor costo acumulado	69
CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		70
5.1	Comparación de trazado propuesto y optimizado.....	70
5.2	Análisis de sensibilidad	71
5.3	Valorización de impactos ambientales de trazado propuesto y optimizado	74
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		80
6.1	Conclusiones.....	80
6.2	Recomendaciones	84
BIBLIOGRAFÍA.....		87
ANEXO I: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....		90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ejemplo de valoración de cobertura de vegetación.	27
Tabla 2: Capas <i>raster</i> de información ambiental.	29
Tabla 3: <i>Shape</i> considerados para la dimensión física.....	48
Tabla 4: <i>Shape</i> considerados para la dimensión biótica	48
Tabla 5: <i>Shape</i> considerados para la dimensión cultural	49
Tabla 6: <i>Shape</i> considerados para la dimensión económica.....	49
Tabla 7: Valoración vulnerabilidad de acuíferos	50
Tabla 8: Valoración de vulnerabilidad de acuíferos.....	50
Tabla 9: Valoración de erodabilidad.....	51
Tabla 10: Valoración desertificación	51
Tabla 11: Valoración de pendientes.....	52
Tabla 12: Valoración de salares	54
Tabla 13: Valoración del drenaje	54
Tabla 14: Valoración de Sitios prioritarios y Áreas Silvestres Protegidas del Estado de Chile	55
Tabla 15: Valoración de la vegetación.....	55
Tabla 16: Valoración de áreas de desarrollo indígena.....	56
Tabla 17: Valoración de Zonas y Centros de Interés Turístico Nacional (ZOIT y CEIT pertenecientes al área de estudio)	57
Tabla 18: Valoración de sitios arqueológicos	57
Tabla 19: Valoración de aeródromos.....	58
Tabla 20: Valoración de ciudades	59
Tabla 21: Valoración de caminos	59
Tabla 22: Formulario para la aplicación del método método <i>Delphi</i>	63
Tabla 23: Valoración de las dimensiones ambientales según método <i>Delphi</i>	64
Tabla 24: Valoración de dimensiones ambientales	71
Tabla 25: Valoración de impactos ambientales del trazado original.....	77
Tabla 26: Valoración de impactos ambientales del trazado optimizado.	78
Tabla 27: Caso N°1, análisis de sensibilidad.....	90

Tabla 28: Caso N°2, análisis de sensibilidad.....	91
Tabla 29: Caso N°3, análisis de sensibilidad.....	92
Tabla 30: Caso N°4, análisis de sensibilidad.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Método de promedios ponderados.....	12
Figura 2: Método de lógica Booleana.	13
Figura 3: Resta de mapas.	14
Figura 4: Método para calcular el costo acumulado de viaje.....	17
Figura 5: <i>Backlink</i>	18
Figura 6: Ruta de mínimo costo.....	19
Figura 7: Resumen de la metodología propuesta para la optimización ambiental de trazados de líneas de transmisión eléctrica.	24
Figura 8: Ejemplo de capa de vegetación en formato <i>raster</i>	28
Figura 9: Área de estudio.....	35
Figura 10: Áreas Protegidas y Sitios Prioritarios Línea 2x220 kV Crucero-Lagunas.....	39
Figura 11: Trazado preliminar, propuesto por Transelec.....	44
Figura 12: Salar de Lllamará y tapetes microbianos	45
Figura 13: Localidad de Quillagua.....	46
Figura 14: Sector explotación minera (SQM).	46
Figura 15: Subestación Lagunas y Subestación Crucero.....	47
Figura 16: Dimensión Física (DF).....	60
Figura 17: Dimensión Biótica (DB).	61
Figura 18: Dimensión Cultural (DC).	61
Figura 19: Dimensión Económica (DE).	62
Figura 20: Suma de dimensiones ambientales.	66
Figura 21: <i>Raster</i> de costos acumulados (<i>cost-weighted</i>).	67
Figura 22: <i>Raster</i> de dirección (<i>Cost weighted direction</i>).....	68
Figura 23: Trazado optimizado mediante <i>Shortest Path</i>	69
Figura 24: Trazado optimizado v/s trazado original.....	70
Figura 25: Comparación de 4 casos analizados.	72
Figura 26: Comparación de 4 casos analizados, salida de subestación Lagunas.	73
Figura 27: Comparación de 4 casos analizados, llegada a subestación Crucero.....	73

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Gráfico resumen de valorización de dimensiones ambientales.	64
Gráfico 2: Trazado optimizado v/s trazado original.....	79

RESUMEN

El presente trabajo se enmarca dentro de la realización de una metodología de optimización ambiental de trazados de líneas de transmisión eléctrica, minimizando los impactos sobre el medio ambiente y ayudando en la toma de decisiones.

El diseño de la metodología de optimización ambiental de trazados de transmisión eléctrica considerara las restricciones ambientales asociadas al medio físico, biótico y sociocultural, dando prioridad a los componentes ambientales más relevantes de la zona de estudio.

Se utilizarán los sistemas de información geográfica SIG para la selección de la mejor alternativa de proyecto, utilizando operaciones de superposición y calculadora de mapas para encontrar la mejor alternativa. El uso de esta herramienta brinda la posibilidad de visualizar gráficamente las mejores ubicaciones espaciales de los proyectos y ayudar finalmente a la toma de decisiones.

Esta metodología se aplicará en un caso real, evaluando sus resultados y comparándola con el trazado propuesto originalmente por la empresa eléctrica TRANSELEC.

Con respecto a los resultados, la metodología propuesta de optimización ambiental de trazados de líneas de transmisión eléctrica es adecuada y cumple con mejorar la gestión ambiental, disminuyendo los impactos y efectos ambientales de esta tipología de proyectos.

Palabras clave: optimización, medio ambiente, líneas, eléctricas.

ABSTRACT

The present work it is within the development of a route environmental optimization for Overhead Transmission Lines, minimizing environmental impacts and helping in decision-making.

The Overhead Transmission Lines routes environmental optimization methodology's design considers environmental restrictions due to physical, biotic and sociocultural aspects. Priority is given to the most important environmental component on the study area.

Geographic Information Systems GIS are used to select best project alternative by means of overlapping operations and map calculator to select the most adequate alternative. This tool brings the possibility to visualize the spatial locations of the projects and helps in choice the final decision.

This methodology would be applied to a real life case, comparing the obtained results with the route originally proposed by the utilities company TRANSLEC.

Respecting the obtained results, the proposed methodology for environmental Overhead Transmission Lines routes optimization is adequate and achieves the improvement the environmental management, minimizing the effects and impacts of the type of projects.

Keywords: optimization, environmental, lines, electrical.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El sector energético en Chile, actualmente, presenta un gran crecimiento producto de la alta demanda de energía del sector productivo, es así como también se necesitan nuevas instalaciones para la transmisión de electricidad entre las generadoras de energía eléctrica y los consumidores finales de electricidad.

Para la construcción de los proyectos de inversión se deben cumplir normas y estándares ambientales que son evaluados por organismos del estado con competencia ambiental, considerando los impactos y efectos sobre el medio ambiente y también sobre la población existente.

Los proyectos lineales como las líneas de transmisión eléctrica se establecen sobre características del territorio que varían considerablemente de un lugar a otro, dependiendo de las características del terreno, de los recursos naturales y de la población existente, además de las características constructivas y de diseño de las torres de alta tensión y de sus obras anexas.

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente el trazado de líneas de transmisión eléctricas no es optimizado ambientalmente y muchas veces los impactos ambientales son difíciles de mitigar, reparar o compensar, por lo que una optimización ambiental presentaría grandes ventajas tanto en la disminución de costos para las

empresas, así como también para la minimización de los impactos sobre el medio ambiente.

Ante este escenario, que es cada vez más exigente en materias ambientales y sociales, se estima necesaria una optimización ambiental del emplazamiento de los proyectos de inversión, considerando la minimización de los costos de construcción y también de los impactos ambientales de los proyectos.

Las líneas de transmisión eléctricas pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente, tanto durante las etapas de construcción y operación, debido a factores tales como los campos electromagnéticos, la corta de bosques, la fragmentación del hábitat, la visibilidad de las torres de alta tensión y el cruce por zonas densamente pobladas o ambientes frágiles (Bagli, 2011).

Para la determinación de trazados eléctricos deben ser considerados criterios ambientales, sociales, técnicos y económicos. Cada uno de ellos ponderados de acuerdo a cada especialidad (Kaousia, 2012).

La construcción, operación y mantenimiento de líneas de transmisión ha tenido en el corto y largo plazo efectos en el medio ambiente. Los mayores impactos resultan del mantenimiento y las actividades de construcción, como la habilitación de caminos de acceso, limpieza de vegetación en la franja de servidumbre y la preparación del terreno (Singh, 2002).

La meta óptima en la construcción de nuevas líneas de transmisión debería ser minimizar efectivamente los impactos negativos sobre las personas y el medio ambiente y al mismo tiempo garantizar la seguridad, fiabilidad y ahorro de costos para la empresa.

Las líneas de transmisión ubicadas con experiencia profesional mediante un enfoque clásico que consiste en dibujar las rutas, basado en mapas de papel, fotografías aéreas y visitas de terreno, carecen de una metodología analítica, detallada y coherente. En consecuencia, no se cuenta con una metodología estándar global y a menudo el diseño de los trazados de líneas de transmisión eléctrica han tenido que ser reevaluados, resultando en retrasos en los plazos y costos adicionales de los proyectos (Schmidt, 2009).

El diseño manual de una línea de energía eléctrica es actualmente una actividad costosa y que requiere masiva información espacial detallada y de profesionales con altas competencias en terreno (Monteiro, 2005).

El análisis de un requerimiento que viene exigiéndose cada vez con más énfasis a los grandes proyectos de desarrollo, como es el atender intereses y contar con criterios de los actores involucrados, considerándolos en la toma de decisiones, de forma tal que se alcance un balance óptimo en los objetivos sociales, económicos y ambientales del mismo proyecto, en toda su vida útil (Cadena, 2004).

La planificación es la clave para el éxito de los proyectos en desarrollo, una buena planificación antes de la construcción puede anticiparse a los problemas y minimizar el impacto ambiental, proporcionando medidas ambientales adecuadas (Alberta, 2003).

La determinación de la ruta óptima de una línea de transmisión eléctrica es un problema espacial. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son actualmente una de las herramientas más eficaces para resolver problemas espaciales complejos.

Los modelos de datos *raster* que se utilizan para el almacenamiento y visualización de datos espaciales proporciona importantes ventajas especialmente para proyectos lineales con grandes dimensiones y en los que su emplazamiento implica usos extensos de terreno (Yildirim, 2010).

Los SIG constituyen una importante herramienta en las tareas de planificación ambiental y ordenación del territorio. Con ellos es posible resolver con mejores criterios complejos problemas de asignación "óptima" de actividades al territorio, considerando para ello tanto su aptitud intrínseca, como el posible impacto ambiental de la localización, en ese punto del territorio, de una concreta actividad (Bosque, 2000).

Una alternativa a la problemática antes mencionada, es la utilización de un método cuantitativo en la toma de decisiones, con base en la lógica difusa denominado Análisis Multiobjetivo Difuso, seleccionado por sus propiedades para manejar información de carácter impreciso y que permite encontrar soluciones satisfactorias que minimicen los impactos ambientales en las diferentes dimensiones del medio ambiente (Vinasco, 2005).

1.3. Hipótesis

1.3.1. Hipótesis general

La realización de una metodología de optimización ambiental de trazados de transmisión eléctrica minimizará los impactos sobre el medio ambiente, optimizando la toma de decisiones.

1.3.2. Hipótesis específicas

- La metodología de optimización ambiental de los trazados eléctricos disminuirá los impactos ambientales.
- La optimización ambiental de los trazados de transmisión eléctrica generará una alternativa factible de materializar entre dos subestaciones eléctricas.
- La metodología propuesta mejorará la toma de decisiones en función de las variables y aspectos ambientales más relevantes y sensibles.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar una metodología de optimización ambiental de trazados de transmisión eléctrica, considerando restricciones ambientales asociadas al medio físico, biótico, sociocultural y construido.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar una metodología de optimización ambiental de trazados de transmisión eléctrica.
- Optimizar la toma de decisiones y la elección de alternativas de trazados de líneas eléctricas que disminuyan los impactos y efectos sobre el medio ambiente.
- Aplicar la metodología en un caso real y evaluar sus resultados.

1.5. Estructura del documento

En el capítulo II se entrega un marco teórico en el cual se describen algunas técnicas de localización de proyectos y la elaboración de mapas temáticos por medio de técnicas como la lógica Booleana, ruta de menor costo y promedios ponderados, entre otros.

En el capítulo III se explicará detenidamente la metodología la cual considera la integración de las técnicas y métodos de localización de proyectos.

En el capítulo IV se aplicará la metodología de optimización ambiental de trazados eléctricos, a un caso real de un proyecto en el norte de Chile.

En el capítulo V se analizarán los resultados de la aplicación de la metodología propuesta.

En el capítulo VI se incluyen las conclusiones del trabajo realizado y también algunas recomendaciones.

Finalmente se incluyen los anexos, correspondientes al análisis de sensibilidad como resultado de la aplicación de la metodología en un caso real.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

La publicación de la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente marca un hito histórico en la Política de Estado en cuanto a temas ambientales, ya que su aplicación ha permitido importantes avances en la gestión ambiental del país. Esta Ley corresponde al marco jurídico del desarrollo de la actividad económica nacional y establece los principios generales para dar coherencia y organización a toda la legislación ambiental existente en Chile.

A partir de esta Ley, los proyectos o actividades en ella señalados, y especificados también en el Reglamento, sólo podrán ejecutarse o modificarse previa evaluación de su impacto ambiental.

Dicha evaluación considera los efectos ambientales de los proyectos, cuyos impactos pueden ser minimizados con un adecuado diseño que considere los aspectos y componentes del medio ambiente, tanto en su dimensión biológica, socioeconómica y cultural.

La selección de la alternativa con menor impacto ambiental debería constituirse en un ejercicio previo al desarrollo de un proyecto, en las primeras etapas de planificación y estudios de prefactibilidad y factibilidad, buscando con ello disminuir en algún grado las consecuencias negativas de tomar una decisión equivocada que puede traer consigo impactos ambientales de mayor magnitud que ocasionarían mayores costos y dificultades en la gestión ambiental al proyecto.

Desde la perspectiva del diseño y construcción de líneas de alta tensión, estas obras suelen pasar por una mayor diversidad de ecosistemas y comunidades, los cuales pueden verse afectados por los impactos ambientales

que se van localizando a lo largo de su corredor de influencia haciendo compleja su planificación (Vinasco, 2005).

Para la selección de las alternativas de proyectos frecuentemente se utilizan los SIG, los cuales mediante operaciones de superposición en la denominada “calculadora de mapas” o mediante la programación de operaciones matemáticas encuentran la mejor alternativa. Los SIG realizan análisis y manipulación de cartografía digital asociada a bases de datos, el uso de esta herramienta brinda la posibilidad de visualizar gráficamente las mejores ubicaciones espaciales de los proyectos. Los SIG pueden ser utilizados para encontrar la mejor alternativa de localización de proyectos lineales como son las líneas de transmisión eléctrica por medio de un análisis integral de los diferentes componentes ambientales.

2.1 Técnicas de generación de alternativas de localización

2.1.1 Elaboración de mapas temáticos

Consiste en la elaboración de mapas temáticos para cada una de las dimensiones analíticas que se está teniendo en cuenta (física, biótica, cultural, económica, medio construido y política) definiendo en cada una de ellas áreas aptas para la ubicación del proyecto y áreas con niveles de restricción progresivos. Es usual que estas áreas se coloreen siguiendo una convención tipo semáforo (verde = aptitud plena; amarillo = precaución; rojo = restricción).

Mediante la superposición de las diferentes capas temáticas sobre una base cartográfica común, se identifican áreas con diversos niveles de aptitud, criticidad y restricción. Esta técnica permite la realización de operaciones tales

como la exclusión de posibles emplazamientos para el proyecto, la confirmación de otros sitios o corredores que no presentan ninguna criticidad o es manejable con una adecuada gestión y la delimitación del área de estudio para las etapas siguientes, lo que permite concentrar los esfuerzos en las zonas sobre las que se tiene una razonable certeza de ser adecuadas para el desarrollo que se pretende implementar.

La disponibilidad de imágenes de satélite en diferentes bandas del espectro de una amplia cobertura de aerofotografía y de cartografía a escalas detalladas hace de esta técnica una opción para las etapas de localización de rutas y proyectos. La técnica es relativamente sencilla de desarrollar a través de un sistema de información geográfico (SIG), con la ventaja de una alta versatilidad en el orden de superposición de las capas temáticas y la facilidad para explorar varias reglas de combinación de las criticidades y restricciones asociadas (Angel, 2004).

Para generar los mapas de criticidad ambiental debe realizarse un análisis de las posibilidades y restricciones ambientales con el objeto de identificar no solo los impactos que puede causar el proyecto sobre el ambiente, sino las restricciones que puede imponer el ambiente al proyecto. El empleo del Modelo de Gestión Ambiental por Dimensiones, permite analizar el impacto ambiental que tendría el proyecto particular en las diferentes variables en las dimensiones ambientales relevantes en la zona de emplazamiento del proyecto (Vinasco, 2005).

Para analizar los impactos ambientales que podrían generarse en el desarrollo de proyectos, es útil emplear el Modelo de Gestión Ambiental por Dimensiones propuesto por Ángel, Carmona y Villegas (2001). Este modelo

concibe el medio ambiente como una integralidad entre las dimensiones del medio ambiente:

- **Dimensión física:** está constituida por los procesos y rasgos físicos del entorno que soportan los sistemas naturales y sociales.
- **Dimensión biótica:** se construye a partir de una perspectiva ecosistémica, es decir, abordando de manera integral la cadena de relaciones de dependencia e interdependencia y los mecanismos adaptativos particulares de los seres vivos en un sistema biótico dado.
- **Dimensión cultural:** se analiza la noción operativa de cultura como adaptación dinámica de los grupos humanos a su ambiente natural y social y a las transformaciones sobre el mismo, originadas en los impactos de los proyectos de desarrollo.
- **Dimensión económica:** centra su análisis en la relación hombre/recursos productivos, en distintos ámbitos territoriales y sociales afectados por el proyecto (Vinasco, 2005).

a) Promedios ponderados

Consiste en la ponderación de los niveles de restricción en cada temática por un peso o valor de preferencia de esa temática frente a las demás. Se realiza la ponderación usando una función aditiva, que en este caso es equivalente a un promedio ponderado. En otras palabras, se realiza la sumatoria de los valores de restricción multiplicados por su importancia relativa. Sean los mapas X, Y, Z, donde X, Y son los mapas a superponer y Z el mapa resultante de esta superposición. Luego, para cada celda X_i , Y_i y Z_i , se tiene:

$Z_i = a(X_i) + b(Y_i)$, donde a y b son los factores de ponderación.

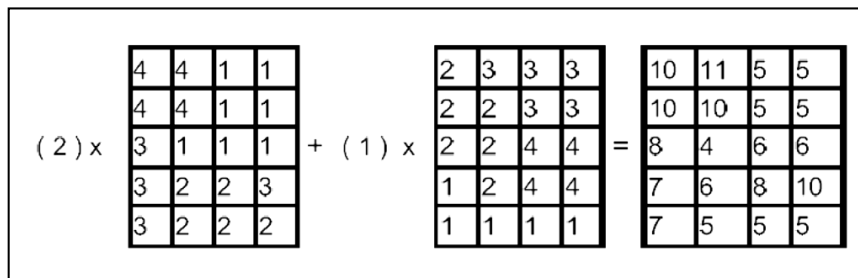


Figura 1: Método de promedios ponderados.

Fuente: Angel, 2004.

Esta lógica tiene la ventaja de ser de sencilla implementación, pues se reduce a usar una característica de los paquetes de SIG, llamada “calculadora de mapas”. Sin embargo presenta desventajas que pueden ser graves dependiendo de la magnitud de los proyectos analizados y de los impactos involucrados, la principal es que en los sitios que presentan una temática restrictiva y las demás de aptitud plena, el valor síntesis aparece como de mediana aptitud, restándole valor a la restricción, debido a la mecánica operativa propia del método. Otra desventaja es que requiere un manejo cuidadoso en la redefinición o reescalamiento de los límites máximos y mínimos para cada etapa de agregación de mapas, pues de no hacerlo así se ponderarán más aquellas dimensiones que posean mayor información y se valorarán por lo bajo aquellas que posean menos información (Angel, 2004).

b) Lógica Booleana

Realiza un manejo puramente simbólico del nivel de restricción en cada punto. Funciona con los operadores tradicionales de la lógica matemática; unión, intersección, negación. Esta lógica asigna al valor síntesis, usualmente, la mayor restricción presente en alguno de los mapas temáticos.

El valor de restricción en el mapa síntesis será igual al mayor valor de la misma celda de los dos mapas superpuestos.

Si se superponen los dos mapas del ejemplo anterior, para cada celda X_i , Y_i , Z_i , se tiene:

4	4	1	1		2	3	3	3		4	4	3	3
4	4	1	1		2	2	3	3		4	4	3	3
3	1	1	1	+	2	2	4	4	=	3	2	4	4
3	2	2	3		1	2	4	4		3	2	4	4
3	2	2	2		1	1	1	1		3	2	2	2

Figura 2: Método de lógica Booleana.

Fuente: Angel, 2004.

Presenta la ventaja de ser conservadora, pues considera, para una localidad, que la gestión total será tan compleja como lo sea la más compleja de las temáticas involucradas. Este rasgo es también su principal debilidad, pues refleja un panorama muy pesimista para la realización del proyecto y tiene la característica de que el nivel de restricción total va aumentando, usualmente, cuando se van agregando mapas con mayores temáticas. Esto se refleja en mayores costos de construcción de los proyectos lineales, pues implica mayores longitudes, que permitan alejarse de todas las restricciones.

c) Resta de Mapas

Cuando se están analizando diferentes metodologías para llegar a un mapa síntesis, es necesario comparar los resultados obtenidos con el fin de establecer sus diferencias o similitudes. Se puede encontrar las diferencias

entre ellos a partir de una comparación visual, pero dada la dificultad que presenta para el cerebro el manejo de muchos colores y formas simultáneamente, se hace necesario buscar una manera objetiva de hacerlo.

Una metodología sencilla de llevar a cabo esta comparación es hacer una resta algebraica de mapas. El mapa obtenido a partir de la resta permite visualizar las diferencias entre zonas similares de ambos mapas, determinándose de esta forma aquellas que presentan mayores diferencias, gráficamente se puede representar de la siguiente forma:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 4 & 4 & 2 & 2 \\ \hline 4 & 4 & 1 & 1 \\ \hline 3 & 2 & 2 & 1 \\ \hline 3 & 3 & 3 & 4 \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 2 & 2 & 3 & 3 \\ \hline 4 & 4 & 3 & 3 \\ \hline 2 & 2 & 1 & 3 \\ \hline 2 & 2 & 3 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 2 & 2 & -1 & -1 \\ \hline 0 & 0 & -2 & -2 \\ \hline 1 & 0 & 1 & -2 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 3 \\ \hline \end{array}$$

Figura 3: Resta de mapas.

Fuente: Angel, 2004.

d) Ruta de Menor Costo Acumulado

La base de este método consiste en establecer una analogía entre el impacto ambiental acumulado por la construcción de un proyecto lineal y el costo de viaje de un viajero a través de una superficie. En ambos casos se tiene un territorio, la intención de ir de un punto predeterminado a otro, la necesidad de ir atravesando diferentes áreas del territorio con diferentes grados de dificultad y una función objetivo a minimizar.

La superficie de costos de viaje define la fricción o costo para moverse, planimétricamente, una unidad de distancia a través de una celda. Los valores

de las celdas de la superficie de costos de viaje pueden ser enteros o decimales, pero no pueden contener valores negativos, ya que no se puede tener un costo de viaje negativo, esto equivaldría a afirmar que el viajero no gastó nada y además recibió una prima por pasar por allí, en términos ambientales implicaría afirmar que no se causará ningún impacto ambiental y en vez de eso, se mitigará un impacto existente previamente. A partir de la superficie de costos de viaje se estiman la superficie de costos Acumulados de viaje y el «BackLink¹», superficies necesarias en el cálculo de la ruta de menor costo (Angel, 2004).

El costo de viaje de una celda a otra es el promedio de los costos entre ambas celdas multiplicado por la distancia entre los centros de las mismas:

Fórmula 1:

$$CV_{1-2} = D_{1-2} * \frac{(C1 + C2)}{2}$$

Donde:

CV 1-2: Costo de viaje entre dos celdas (1-2)

D 1-2: Corresponde a la distancia entre la celda origen (1) y la celda destino (2)

C1: Valor de la celda 1

C2: Valor de la celda 2.

Se puede definir el costo acumulado de viaje de una celda como el costo para viajar de esta celda a la celda destino, a través de las celdas con el menor costo acumulado de viaje. En otras palabras, el costo de viaje es acumulado a medida que el algoritmo procede, alejándose de la celda destino, teniendo las

¹ El *Backlink* es una matriz de rutas de mínimo costo de viaje para todas las celdas bajo análisis.

celdas más alejadas a la celda destino un mayor costo acumulado. La expresión para definir el costo acumulado de viaje es:

Fórmula 2:

$$CAV_2 = CA_1 * D_{1-2} * \frac{(C1 + C2)}{2}$$

Donde:

CAV2: Costo acumulado de viaje (2)

CA1: Costo acumulado del origen a la celda 1.

D1-2: Corresponde a la distancia entre la celda origen (1) y la celda destino (2).

C1: Valor de la celda 1

C2: Valor de la celda 2.

El método para calcular el costo acumulado de viaje es iterativo, empezando desde la celda destino para luego irse alejando. La celda origen no está involucrada en este cálculo. En la primera iteración, la celda destino es identificada y asignada con un valor de costo acumulado de 0.

En la segunda iteración, a cada una de las celdas inmediatamente vecinas, tanto ortogonal como diagonalmente, se les calcula el costo para llegar a la celda destino y se les asigna ese valor como costo acumulado.

En la tercera iteración, el cálculo se realiza para la siguiente fila concéntrica de celdas. Para cada una de ellas se calcula el costo de viaje de ella a las celdas adyacentes que ya tienen el costo acumulado de viaje

calculado. Se suman ambos y se obtienen varias posibles rutas, cada una de ellas basada en el costo acumulado de viajar de la celda en cuestión a la celda destino. El punto decisivo es que se selecciona entre las posibles rutas la que presente el menor costo acumulado de viaje, con lo cual se garantiza que cuando se realice la cuarta iteración y las subsiguientes, el valor que se presenta en la superficie de costos acumulados, será el menor posible. Esto garantiza que el método encuentre el camino de menor costo total.

Este proceso continúa a través de muchas iteraciones, siempre expandiéndose alrededor de la celda destino y siempre acumulando el menor costo para llegar a este. El proceso termina cuando todas las celdas son calculadas. La anterior explicación se puede ejemplificar como sigue:

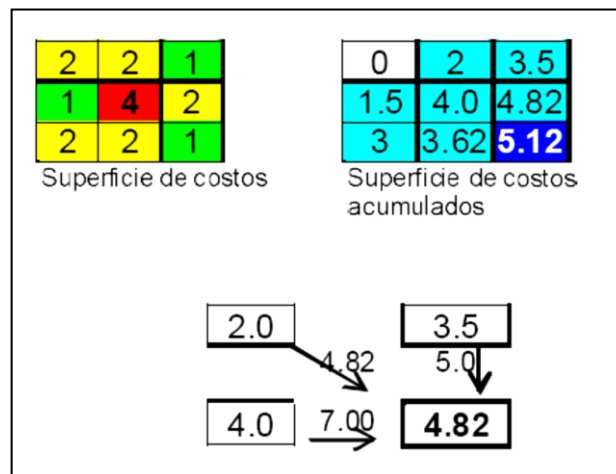


Figura 4: Método para calcular el costo acumulado de viaje.

Fuente: Angel, 2004.

En este ejemplo se pretende viajar de la celda inferior derecha a la celda superior izquierda del área representada en la superficie de costos.

Comenzando con la primera iteración, tenemos que a la celda destino se le asigna un valor de 0, ya que aún no hay costo de viaje.

Para calcular el valor de la celda de costo acumulado 4.82, se estiman los costos acumulados por todas las posibles rutas que llevan a las celdas cuyos costos acumulados ya están calculados (4.82, 5.0 y 7.00) se selecciona como acumulado el valor 4.82 que es el menor de ellos.

El “*Backlink*” es una superficie de las mismas dimensiones que las anteriores, en la que se ha almacenado, para cada celda, la dirección que habría que seguir, estando ubicado en esa celda, para tomar la ruta de mínimo costo. Esta dirección se almacena de acuerdo con un código, siguiendo la convención que se muestra a continuación:

6	7	8
5	0	1
4	3	2

Figura 5: *Backlink*.

Fuente: Angel, 2004.

Por ejemplo, una celda con código 6 dentro del “*Backlink*”, tiene como su celda vecina dentro de la ruta de menor costo “*Least Cost Path*” a la celda superior izquierda. De la misma manera, si una celda es de código 5, entonces la celda a su izquierda es la siguiente celda a lo largo del “*Least Cost Path*”. Por lo tanto el “*Backlink*” encierra, por la manera como está construido, la totalidad de las rutas óptimas posibles, es decir, una para cada celda dentro del área geográfica. Una vez determinado cuál es el punto de origen, basta con situarse en él y moverse en la dirección que el «*BackLink*» indique para esa celda y

continuar aplicando las instrucciones de movimiento codificadas en el “*Backlink*” hasta llegar al punto de destino. Utilizando el ejemplo propuesto se tiene:

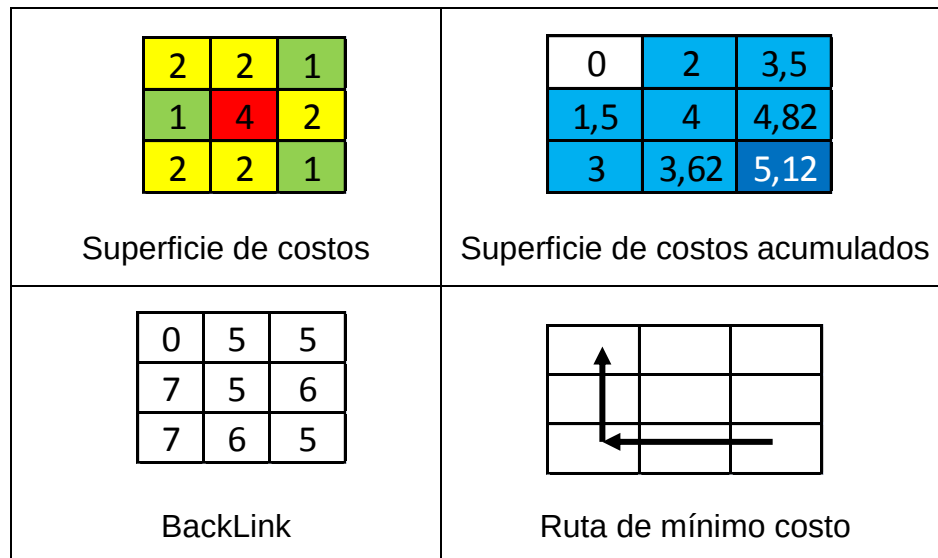


Figura 6: Ruta de mínimo costo

Fuente: Angel, 2004.

e) Determinación de Corredores para el Trazado de Proyectos

El empleo de la ruta de mínimo costo genera una única solución al problema, solución que, desde el punto de vista técnico, puede parecer demasiado rígida. Para manejar este problema se pueden generar corredores para el trazado de los proyectos. Si se tienen dos puntos A y B, inicio y fin de la ruta propuesta, una manera relativamente sencilla de lograrlo es resolver la superficie de costo acumulado de acercarse hacia el punto A; de manera independiente, generar la superficie de costo acumulado de acercarse al punto B y sumar ambas superficies. El resultado de esta operación es una superficie que tendrá la forma de un valle. Si sobre esa superficie se dibujan curvas de nivel, lo que aparecerá es una serie de corredores, de sobrecostos crecientes conforme se alejan de la ruta de mínimo costo. Esto permite a los diseñadores tener una serie de corredores, de amplitud creciente, dentro de los cuales se

pueden lograr otros requerimientos de carácter técnico, por ejemplo ángulos máximos en cada vértice de una línea de transmisión, sin sobrepasar un porcentaje predefinido de sobre costo por encima del mínimo posible.

2.2 Análisis Multiobjetivo

La técnica conocida como análisis multiobjetivo (A.M.O.) permite el manejo de decisiones muy complejas, con gran número de criterios independientes y frecuentemente en clara contraposición unos con otros. Esta técnica permite la asignación de índices calculados a partir de la magnitud de cada impacto considerado. Estos índices pueden ser evaluados y llevados a expresar la “gravedad” del impacto. Finalmente estos índices pueden ser agregados pesando la gravedad de cada impacto por un factor que mide la “importancia” de ese impacto frente a la evaluación total. Estos pesos constituyen lo que se llama la estructura de preferencias del decisor (Angel, 2004).

2.2.1 Análisis Multiobjetivo Difuso (AMOD)

Una alternativa de solución a la problemática mencionada, se hace posible mediante la integración de Sistemas de Información Geográfica y métodos cuantitativos para la toma de decisiones con múltiples objetivos y con base en la Lógica Difusa denominado Análisis Multiobjetivo Difuso (AMOD), debido a sus propiedades para analizar impactos en múltiples dimensiones y manejar información de carácter impreciso.

La Lógica Difusa, desarrollada inicialmente por Zadeh (1965) permite valorar las variables mediante expresiones lingüísticas como bueno, malo, etc., permitiendo su incorporación explícita a modelos matemáticos.

Por su parte, el Análisis Multiobjetivo permite seleccionar la mejor opción dentro de un grupo de alternativas, comparando su desempeño respecto a dimensiones en conflicto. Generalmente, no existe una alternativa óptima o mejor respecto a todas las dimensiones, pero si existen alternativas pareto-óptimas, esto es, alternativas que no son superadas por ninguna otra en todas las dimensiones. Generalmente, en todo grupo de alternativas a comparar, existe un número de alternativas óptimas, y se requiere no sólo de un análisis matemático, sino también de la incorporación de las preferencias del decisor para seleccionar una de ellas como definitiva (Vinasco, 2005).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA OPTIMIZACIÓN AMBIENTAL DE TRAZADOS DE LÍNEAS DE TRASMISIÓN ELÉCTRICA.

La metodología propuesta para la optimización ambiental de trazados de líneas de transmisión eléctrica considera la aplicación e integración de las técnicas y métodos de localización de proyectos mencionados en el capítulo correspondiente a Marco Teórico, dicha metodología considera los siguientes pasos:

- 1) Recopilación de información del área de estudio:** ésta considera la búsqueda de información de carácter ambiental tanto en formato impreso y digital (*shapes*) de organismos públicos y privados.
- 2) Normalización de la información geográfica:** consiste en la adecuación de los archivos en formato vectorial a formato *raster*.
- 3) Valoración de capas de información ambiental:** consiste en la asignación de rangos de valores de acuerdo a la valorización dada por organismos del estado como CONAF, SAG, DGA, entre otros.
- 4) Suma de capas de información por dimensión ambiental:** para cada dimensión ambiental se suman o adicionan las capas *raster* de información ambiental.
- 5) Asignación de pesos específicos a las dimensiones ambientales:** para las cuatro dimensiones ambientales, es decir la dimensión física, biótica, económica y cultural se asignan pesos específicos apoyados por el método *Delphi* y el criterio de expertos.

- 6) **Suma de dimensiones ambientales:** se realiza la suma o adición de las dimensiones ambientales ponderadas previamente por el peso específico de cada dimensión.
- 7) **Determinación de matriz de costos acumulados:** se determina la matriz de costos acumulados con las herramientas de análisis espacial de *ArcGis*, la cual estima los costos acumulados desde el origen (subestación Lagunas) a todas las celdas del área de estudio.
- 8) **Cálculo de ruta de menor costo acumulado:** se calcula la ruta de menor costo acumulado entre el origen y el destino.

La metodología propuesta no se encuentra consolidada en ningún texto. Ésta es producto de un análisis amplio y el consolidado de distintos métodos, integrando la aplicación de Sistemas de Información Geográfica. Lo anterior es determinante, dado que se debieron seleccionar los aspectos más pertinentes con bajos costos ya que se requiere que las operaciones se realicen celda a celda en matrices de gran número de filas y de columnas.

A continuación se muestra un diagrama resumen de la metodología propuesta para la optimización ambiental de trazados de líneas de transmisión eléctrica:

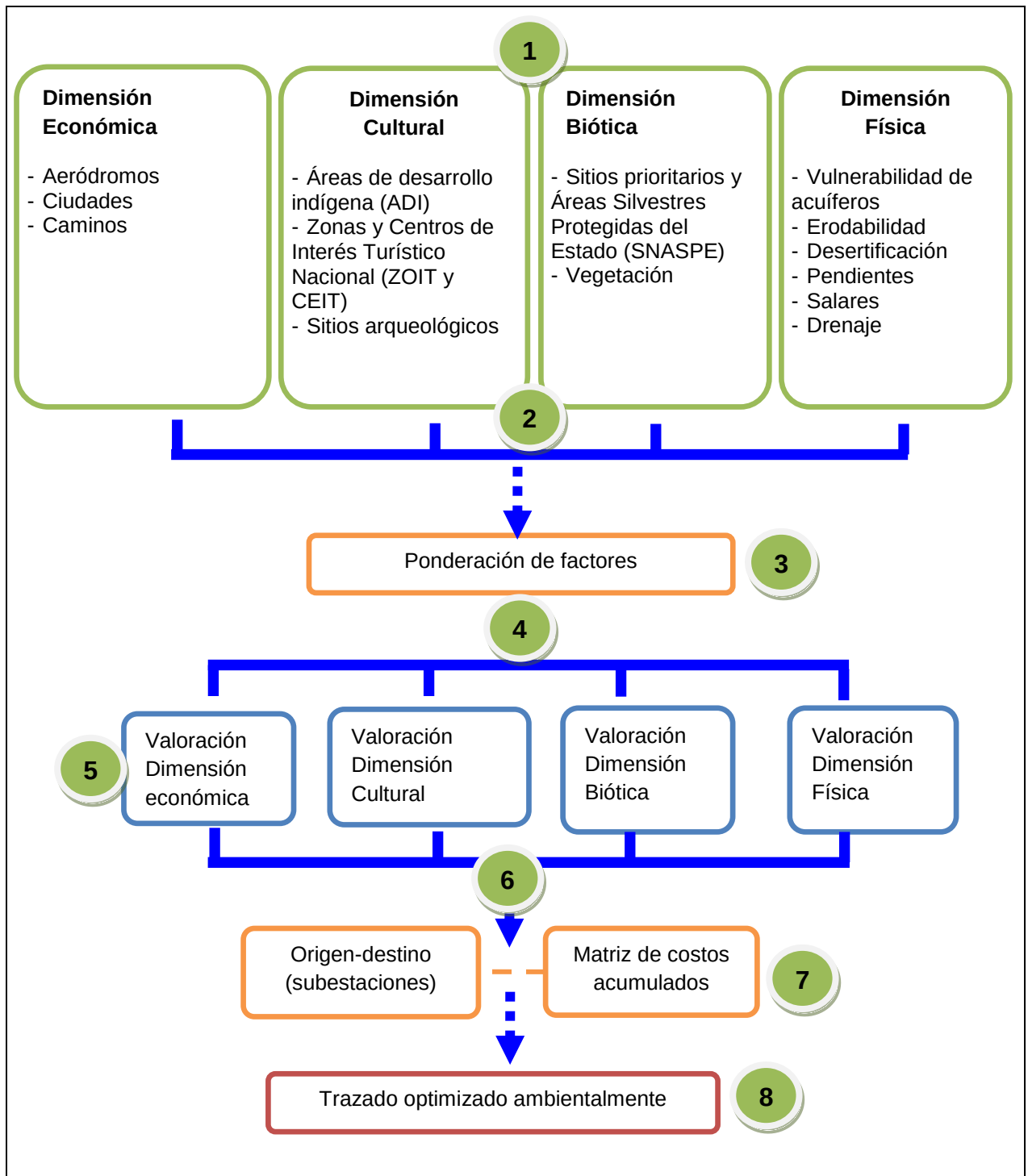


Figura 7: Resumen de la metodología propuesta para la optimización ambiental de trazados de líneas de transmisión eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Recopilación de información del área de estudio

En este primer punto se recopila la información de carácter normativo, bibliográfico y cartográfico (SIG), para el área de estudio, realizándose, entre otras, las siguientes actividades:

- a) Revisión de cartografía temática en formato *Shape* asociada al área de estudio:
 - Áreas protegidas
 - Sitios Prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad
 - Vegetación
 - Localidades pobladas
 - Población protegida
 - Infraestructura
 - Sitios arqueológicos

- b) Revisión de información secundaria a partir de fuentes bibliográficas y documentación de instituciones públicas, tales como:
 - Instrumentos de Planificación territorial vigentes en el área de estudio.
 - Planes de Desarrollo Comunal.
 - Estudios y Declaraciones de Impacto Ambiental de proyectos emplazados en el área de influencia que hayan ingresadas al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental SEIA.
 - Páginas web de las municipalidades e informes emanados del Gobierno Regional.
 - Censo de población y vivienda, año 2002.
 - La Ley N° 19.300, modificada por la Ley N° 20.417, del MINSEGPRES.

- D.S. N°95/2001, “Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental”, del MINSEGPRES.
- Las instrucciones de la autoridad en materia de Sitios Prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad.

La metodología considera en este punto la visita a terreno del área de estudio con el fin de que el tomador de decisiones tenga la mayor cantidad de antecedentes posibles.

3.2 Normalización de la información geográfica

La aplicación de la metodología considera la utilización de la información cartográfica señalada anteriormente, la cual fue recopilada de los distintos organismos públicos del estado en formato *shape* y posteriormente transformada a formato *raster* mediante las herramientas de *Spatial Analysis* de *ArcGis 9.2*.

La información *raster* consideró pixeles de 400m^2 es decir de $20\text{x}20\text{m}$. Se utilizó este tamaño de pixel debido a que las torres eléctricas poseen una superficie promedio equivalente a este pixel y sería la mínima superficie donde éstas podrían emplazarse en terreno.

Las capas de información consideran las dimensiones física, biótica, cultural y económica, las cuales se ajustaron al área de estudio.

3.3 Valoración de capas de información ambiental

Se realizó la valoración de las capas de información ambiental de las distintas dimensiones ambientales, para lo cual se utilizaron los rangos definidos preliminarmente por los organismos estatales. Se utilizó ésta valoración de cada *Shape* porque se consideró la más adecuada para cada tipo de información, es decir la que se ajustaba al criterio de experto según la experticia de cada materia ambiental relacionada.

A modo de ejemplo para la capa denominada “vegetación” se utilizó la información de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), basada en Federico Luebert y Patricio Pliscoff del año 2006 “Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile” la cual contiene información de pisos vegetacionales para todo Chile. Esta información se proceso mediante las herramientas de análisis espacial y se le asignaron lo atributos de forma escalonada, considerando la valorización de 1 a 6 tal como se muestra a continuación:

Tabla 1: Ejemplo de valoración de cobertura de vegetación.

Contenidos	Rango	Valoración
Vegetación	Sin vegetación	1
	Desierto absoluto	2
	Matorral bajo desértico	3
	Matorral bajo de altitud	4
	Matorral desértico	5
	Bosque espinoso	6

Fuente: Elaboración propia.

Shape de vegetación con asignación de valoración de 1 a 6, donde 1 es la condición sin vegetación y el valor 6 corresponde a la de mayor cobertura de vegetación, es decir la de un bosque espinoso.

Gráficamente los datos se observan en una escala fija de valores en función de la importancia de la vegetación, tal como se señala en la siguiente imagen:

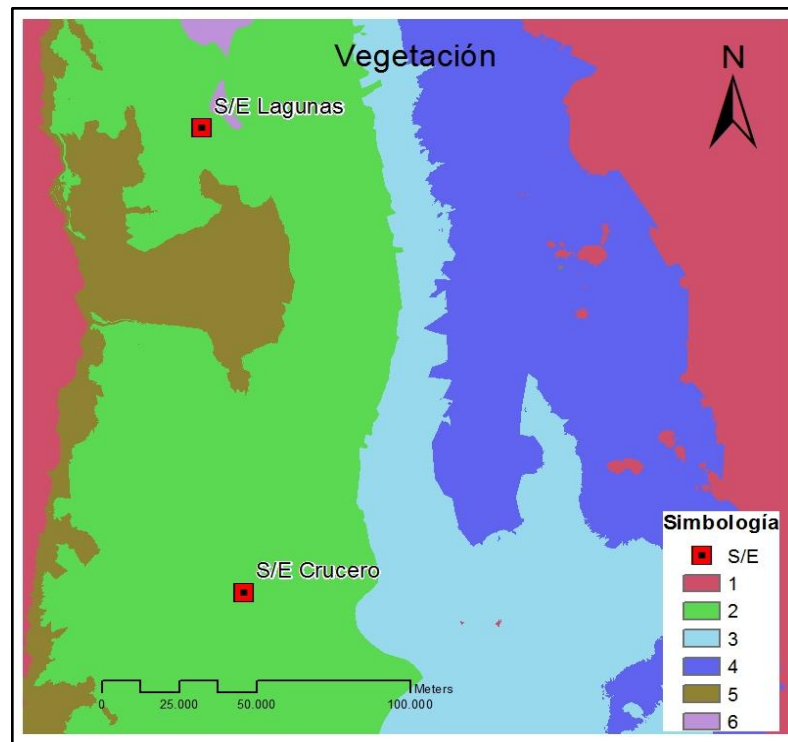


Figura 8: Ejemplo de capa de vegetación en formato *raster*
Fuente: Elaboración propia.

3.4 Suma de capas de información por dimensión ambiental

Una vez obtenida cada capa *raster* con su valoración, se procede a las suma de las capas de información ambiental por cada una de las cuatro dimensiones ambientales, tal como se explica a continuación:

Tabla 2: Capas *raster* de información ambiental.

Dimensión (Dj)	Código	Capas <i>raster</i> de información ambiental (Xj)
Física	DF	Información <i>Raster</i> de dimensión física (acuíferos, erodabilidad, desertificación, pendientes, etc)
Biótica	DB	Información <i>Raster</i> de dimensión biótica (SNASPE, sitios prioritarios, vegetación, etc)
Económica	DE	Información <i>Raster</i> de dimensión económica (camino, ciudades, etc)
Cultural	DC	Información <i>Raster</i> de dimensión cultural (sitios arqueológicos, áreas de desarrollo indígena)

Fuente: Elaboración propia

Matemáticamente se puede resumir de la siguiente forma

Fórmula 3:

$$D_j = \sum_{j=1}^n X_j$$

Donde:

Dj : Sumatoria de la dimensión ambiental j

Xj : Capas *raster* de información ambiental; Xj: 1...n

3.5 Asignación de pesos específicos a las dimensiones ambientales

Una vez obtenidas las capas de información ambiental se procede a la asignación de pesos a las dimensiones ambientales. Dicha valoración considera la aplicación del *método Delphi*, tal cual se detalla a continuación:

3.5.1 Método Delphi

Para verificar los criterios anteriormente expuestos se utilizará el *método Delphi* que se caracteriza por producir una serie de iteraciones en procura de una solución. Identificado el problema, se pide a los miembros del grupo aportar posibles soluciones mediante una serie de cuestionarios diseñados cuidadosamente y que cada miembro completa en forma anónima e independiente. Las respuestas del primer cuestionario son procesadas y una copia de los resultados es enviada a los miembros. A la vista de estos resultados se pide una vez más una solución a los miembros. Los resultados del procesamiento de la segunda consulta muestran nuevas soluciones o modificaciones en las posturas iniciales. Este proceso iterativo se repite cuantas veces sea necesario para encontrar el consenso.

Entre los principales atributos del método *Delphi* está el anonimato de los participantes. Ningún experto que recibe el cuestionario conoce la identidad de los restantes encuestados ni cuál ha sido la respuesta individual. Sólo el administrador o analista de la encuesta puede identificar a cada participante y sus respuestas. Esto presenta una serie de aspectos positivos como:

- i. Reducir el posible predominio de algunas opiniones sobre otras, impidiendo la posibilidad de que un miembro del grupo pueda resultar influenciado por la reputación de otro o por el peso que supone una

confrontación directa o el peso de la mayoría. La congruencia de los argumentos es el único factor que predomina durante el debate.

ii. Retroalimentar las opiniones a través de la iteración del cuestionario facilita la interacción entre los participantes, construyendo por sucesivas aproximaciones la posición general del grupo ante el tema que se analiza.

iii. Permitir que un miembro modifique o matice sus opiniones sin que esto implique una pérdida de imagen ante el grupo o la comunidad científica o la corporación sectorial a la que pertenece. Los participantes pueden defender sus argumentos con la tranquilidad de saber que en caso de que éstos presenten un grado de desviación significativa con la opinión mayoritaria y puedan considerarse erróneos, su cambio de opinión no va a ser identificada por los otros expertos².

² Igarza, R., (2008) Método Delphi, Apuntes para una implementación exitosa. Universidad de Concepción.

3.6 Suma de dimensiones ambientales

Posteriormente se realiza la suma de las dimensiones ambientales ponderadas previamente por el peso específico de cada dimensión.

Fórmula 4:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j * v_{ij}$$

Donde:

r_i : El nivel de adecuación de la alternativa i

w_j : Es el peso del criterio j

v_{ij} : Es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j

3.7 Determinación de matriz de costos acumulados

Se determina a continuación la matriz de costos acumulados con las herramientas de análisis espacial de *ArcGis*, las cuales estiman los costos acumulados desde un punto de origen preestablecido, en este caso desde la subestación Lagunas a todas las celdas del área de estudio.

Dicha matriz contiene los valores de costos acumulados de cada pixel. La superficie de costos de viaje define la fricción o costo para moverse, planimétricamente, una unidad de distancia a través de una celda. Los valores de las celdas de la superficie de costos de viaje en este caso son enteros y positivos. A partir de la superficie de costos de viaje se estiman la superficie de

costos Acumulados de viaje y el «*BackLink*», superficies necesarias en el cálculo de la ruta de menor costo (Angel, 2004).

3.8 Cálculo de ruta de menor costo acumulado

Luego se calcula la ruta de menor costo acumulado entre el origen y el destino. Para esto se utiliza la matriz de costos acumulados y matriz de dirección creadas con la herramienta *spatial analysis* de *ArcGis*.

La función objetivo minimizará los costos acumulados, considerando la matriz de costos y la matriz de dirección generadas por *ArcGis*.

La función objetivo es la que se muestra a continuación.

Fórmula 5:

$$\text{Función objetivo} = \text{MIN} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n r_i \cdot w_{jk} \cdot d_{jk}$$

Donde:

w_{jk} : Matriz de costos acumulados origen-destino

d_{jk} : Matriz de dirección origen-destino

r_i : Nivel de adecuación de la alternativa i

CAPITULO IV: DESARROLLO Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1 Recopilación de información del área de estudio

4.1.1 Características del área de estudio

El área de estudio se ubica en la I Región de Tarapacá y II Región de Antofagasta y considera un polígono de 250x250km es decir de una superficie de 6.250.000 hectáreas, entre las subestaciones Laguna por el norte y Crucero por el sur, de propiedad de Transelec S.A., tal como se muestra en la siguiente figura:

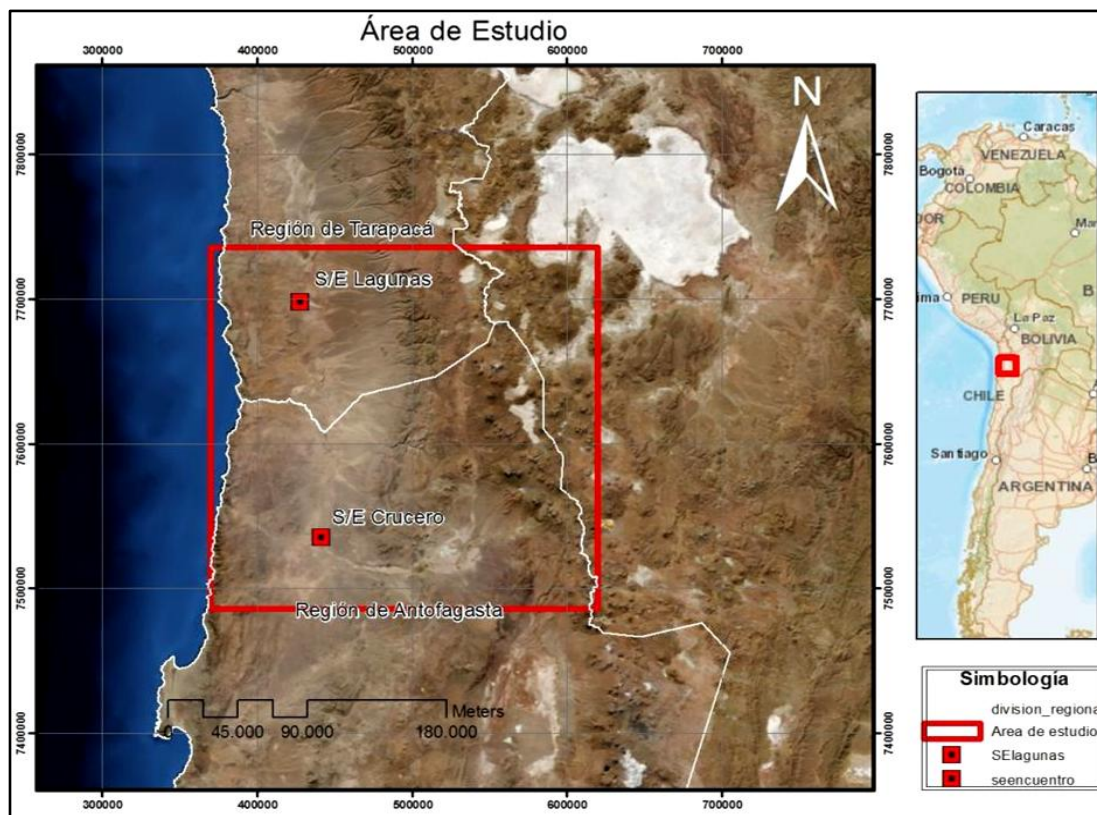


Figura 9: Área de estudio
Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Descripción del proyecto a analizar

Mediante el Decreto Exento Número 82, de fecha 29 de febrero de 2012, que Fija el Plan de Expansión del Sistema de Transmisión Troncal para los doce meses siguientes, la Comisión Nacional de Energía (CNE) estableció el Plan de Expansión del Sistema de Transmisión Troncal (STT) para los próximos doce meses (desde noviembre de 2011). En dicho decreto se estableció que se deberán realizar las obras necesarias para la construcción de una línea de transmisión eléctrica entre las subestaciones Crucero y Lagunas, actualmente existentes.

El trazado inicial tiene una extensión aproximada de 168 km, partiendo desde la subestación Lagunas hacia el sur. Desde el punto de vista ambiental, se identificaron preliminarmente tres (3) zonas que representan un alto valor ambiental y que por tal razón deben ser consideradas a efectos de minimizar los riesgos ambientales. Estas son: el Oasis de Quillagua, el Salar de Llamara y la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal.

Con respecto a la subestación Lagunas, ésta se encuentra dentro de la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal (D.S. 531/67 Ministerio Relaciones Exteriores), la cual se caracteriza por presentar una vegetación homogénea que comprende 18.113 ha de plantaciones de tamarugos, 1.950 ha de plantaciones de algarrobo, 420 ha de plantaciones mixtas y 2.500 ha de bosque nativo de *Prosopis tamarugo* (tamarugo).

4.1.3 Aspectos ambientales, sociales y territoriales del área de estudio

i) Flora y vegetación:

Se evidencia presencia de vegetación asociada al cauce del río Loa, representada por especies arbustivas y herbáceas como la Brea (*Tessaria absinthioides*), el Suncho (*Baccharis juncea*), la Cachina (*Juntus acutus*), la Sosa (*Sacocornia fruticosa*) y árboles como el Chañar (*Geoffroea decorticans*), ninguna de ellas clasificadas en alguna categoría de conservación de las cuales se refiere el artículo 19 de la Ley 20.203 y el Libro Rojo de CONAF (1989) y conforme con el Reglamento de Clasificación de Especies Silvestres Protegidas D.S. N°75/2005 Minsegapres. Potencialmente la zona es hábitats de *Prosopis tamarugo* (tamarugo), especie que según la clasificación del Libro Rojo de la Flora Terrestre de Chile fue evaluado como una especie Vulnerable.

Las poblaciones naturales mejor conservadas se ubican en la localidad de La Huayca y en el salar de Llamara, estas últimas formaciones distantes, aproximadamente, a 8 Km del trazado propuesto por Transelec. La única área protegida donde está representada es la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal.

ii) Fauna

La fauna asociada al bioma desértico interior es escasa y concentrada en hábitats concretos. En los valles antropizados se encuentran aves tropicales como el mataballos y el picaflor chico. En áreas secas puede vivir un reptil, la salamandreja, y en los tamarugales aparece un roedor característico, el tuco-tuco, que sirve de base alimentaria al pequén, una lechuza que caza tanto de

día como de noche. El Tuco Tuco (*Ctenomys robustus*) se encuentra en categoría de conservación como vulnerable de acuerdo al reglamento de la Ley de Caza D.S. N°5/1998.

iii) Áreas Protegidas y Sitios Prioritarios para la conservación de la biodiversidad

La subestación Lagunas, se emplaza aproximadamente a 168 m al interior de la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal (D.S. 531/67 Ministerio Relaciones Exteriores), la cual se caracteriza por presentar una vegetación homogénea que comprende 18.113 ha de plantaciones de tamarugo, 1.950 ha de plantaciones de algarrobo, 420 ha de plantaciones mixtas y 2.500 ha de bosque nativo de tamarugo.

Asimismo en el área de estudio se emplaza el Sitio Prioritario para la Conservación Oasis de Quillagua, reconocido como tal por la autoridad ambiental mediante instructivo de fecha 15 de noviembre del año 2010. D.E. SEA N° 100143). Este sitio se caracteriza por ser un lugar de tránsito de especies, corredor biológico entre mar y puna (único en la región), con presencia de flora endémica y en estado de conservación, como el algarrobo, *Prosopis chilensis*, (Vulnerable), camarón, *Cryphiops caementarius* (Vulnerable), pejerrey *Basilichthys semotilus* (En peligro) y la Loica peruana, *Sturnella bellicosa* (Población reducida).

A continuación se muestran las Áreas Protegidas y Sitios Prioritarios para la conservación de la biodiversidad del área de estudio:

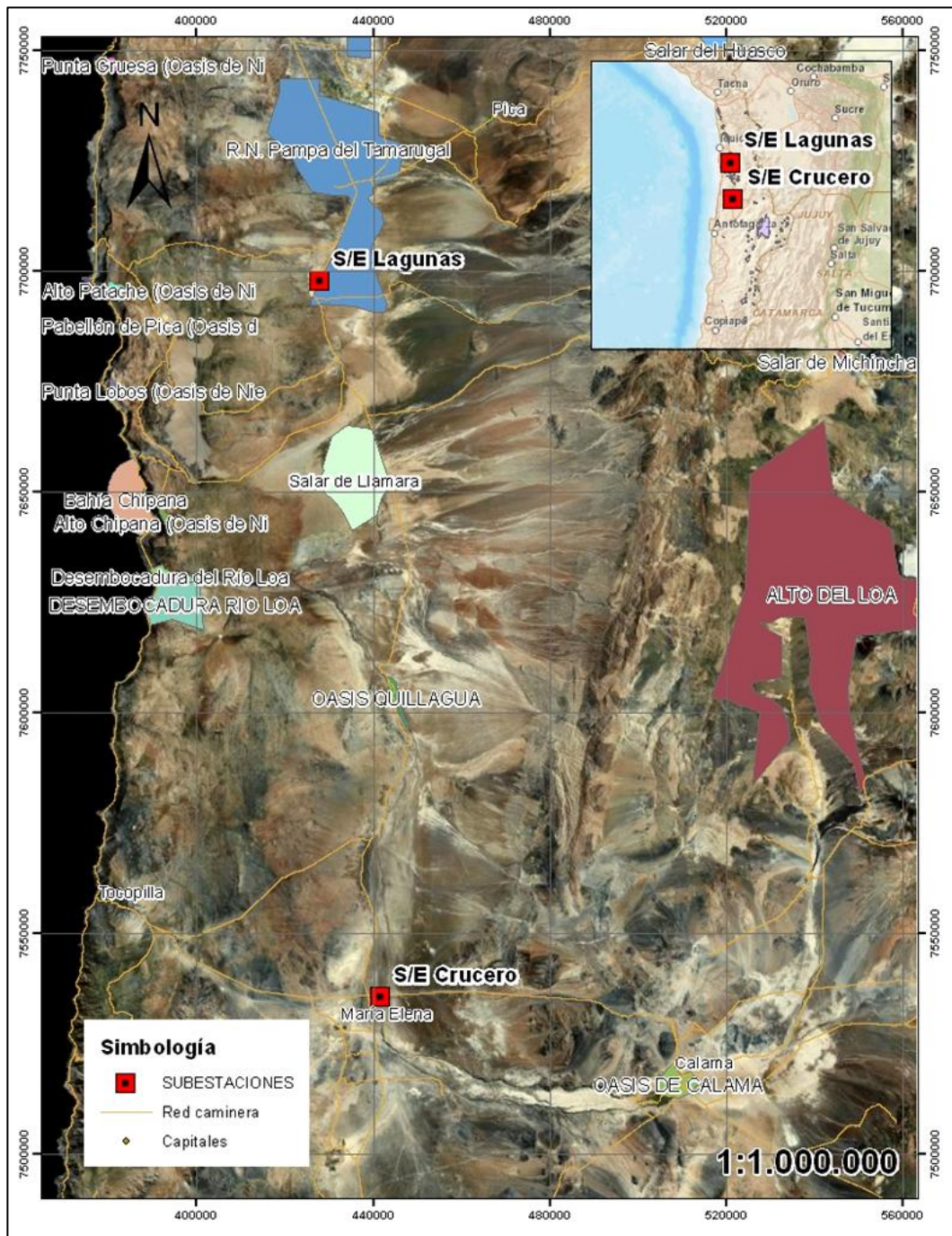


Figura 10: Áreas Protegidas y Sitios Prioritarios Línea 2x220 kV Crucero-Lagunas (Huso 19, Datum WGS 84).
Fuente: Elaboración propia

iv) Áreas de Valor Ambiental

En la comuna de Pozo Almonte se localiza el salar de Llamara. Su relevancia ambiental está dada por la presencia de estromatolitos, estructuras estratificadas de formas diversas (tapetes microbianos), formadas por la captura y fijación de partículas carbonatadas por parte de algas cianofíceas y cianobacterias en aguas someras que, en la fotosíntesis, liberan oxígeno y retiran de la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono. Estas cianobacterias llevan más de 3.500 años en su estado original, es decir, sin evolución. Ellas son las responsables del surgimiento de la vida, existiendo en el planeta solo algunos sectores con estas características (costa oeste de Australia, en las Bahamas, en el Mar Rojo, en Lago Salgada -Río de Janeiro, Cuatro Ciénegas Coahuila de Zaragoza- México y en el Salar de Llamara).

v) Medio Humano

Respecto a la población de las comunas relacionadas, según el Censo 2002, las comunas de Pozo Almonte y María Elena presentan una población de 10.830 y 7.530 habitantes, respectivamente. Con respecto a su relación con la población total regional, la comuna de Pozo Almonte el 2,4% de la población total de la Región de Tarapacá. En el caso de la comuna de María Elena, solo representa el 1,5% de la población de la Región de Antofagasta.

Sobre las localidades aledañas al trazado propuesto por Transelec, estas corresponden a: Ex Oficina Victoria, Colonia Agrícola Pintados, Colonia Agrícola Edén, Quillagua y María Elena.

vi) Turismo

A aproximadamente 9 km del área de emplazamiento del trazado propuesto por Transelec se observa un sector turístico denominado “Valle de Meteoritos”, el cual es visitado por turistas, tanto nacionales como extranjeros, que según algunas interpretaciones, son los rastros de impactos de meteoritos.

vii) Medio Construido

La actividad económica más importante corresponde a la explotación minera (SQM) asociada a la actual explotación en el área de Nueva Victoria. Sin perjuicio de lo anterior, cabe mencionar que a nivel local se desarrollan algunas actividades turísticas en zonas contiguas, específicamente, asociada a las ex oficinas salitreras las que además de poseer instalaciones industriales contaban con zonas urbanas en torno a la actividad minera. A excepción de la oficina Iris todas se encuentran abandonadas y en la actualidad es posible apreciar sus ruinas, como es el caso de la oficina Buenaventura y Bellavista.

Las actividades agrícolas más cercanas al área del estudio se desarrollan en la localidad de Colonia Pintados, ubicada a 14 kilómetros de la subestación Lagunas.

viii) Población Indígena

La población indígena Aymará se emplaza en las localidades de Colonia Pintados, Colonia Edén y Quillagua. En efecto, en Colonia Pintados su población corresponde a población Aymará inmigrantes de pueblos del interior (Camiña). Por su parte, la población quechua es originaria principalmente de Bolivia (Oruro e Uyuni). En la localidad Colonia Edén, existe población Aymará agrupada en torno a la Asociación Indígena Aymará Marka-Pahata. Por su

parte, Quillagua, corresponde a una comunidad indígena Aymará de Quillagua, constituida desde el año 2003.

ix) Arqueología

El oasis de Quillagua, emplazado junto al río Loa, fue un polo de atracción para el asentamiento humano durante la prehistoria local y regional.

Fuera de estos lugares se encuentra el desierto absoluto caracterizado por la escasez de agua, la alta oscilación térmica y la falta de recursos vegetales que impedían un asentamiento prolongado en estos lugares. Así, durante la época prehispánica, el desierto fue empleado como lugar de tránsito y de refugio temporal, caracterizado por sendas, senderos troperos, hitos o marcas y paskanas. En este sentido la Quebrada de Guatacondo – que se conecta con la Ruta 5 Norte– fue un sector de tránsito, acceso y tráfico de bienes (recursos hídricos, forrajeros, mineros, de caza, objetos de prestigio, etc.) en dirección cordillera –costa.

De acuerdo a la revisión bibliográfica en el sector de Quillagua los elementos patrimoniales (geoglifos, cementerios, eventos de talla lítica, asentamientos) se emplazan en las inmediaciones del poblado homónimo, hacia el sur (hacia Quillagua antiguo) y en las terrazas del río Loa, y sólo escasamente se reportan geoglifos. Así, en Quillagua los sitios arqueológicos se encuentran fuertemente impactados por la expansión urbana, el desarrollo minero y la actividad agrícola. Por tal motivo, el descubrimiento de nuevos sitios en estos sectores ocurre generalmente por hallazgos ocasionales y fortuitos debido a las crecidas del río Loa, o a obras tales como trabajos de mejoramiento de caminos, defensas fluviales del río Loa, redes telefónicas, riegos y pozos profundos, entre otros.

En esta área de restricción el elemento patrimonial más próximo al proyecto corresponde al “Geoglifo Los Balseros”.

Otro sector de restricción, desde el punto de vista arqueológico, lo constituye la zona denominada “Rutas Caravaneras. Las rutas caravaneras corresponden a rutas prehispánicas y coloniales se dirigen desde Quillagua hacia la costa (desembocadura del río Loa) que fueron utilizadas para intercambiar recursos del altiplano, el oasis y la costa. Sin embargo, a la fecha no se ha publicado el ruteo pormenorizado de estas vías.

4.1.4 Visita a terreno

Se visitó la zona de estudio los días 3, 4 y 5 de septiembre de 2012, recorriendo un trazado propuesto preliminarmente por el área de ingeniería de empresa Transelec S.A., como se muestra a continuación:

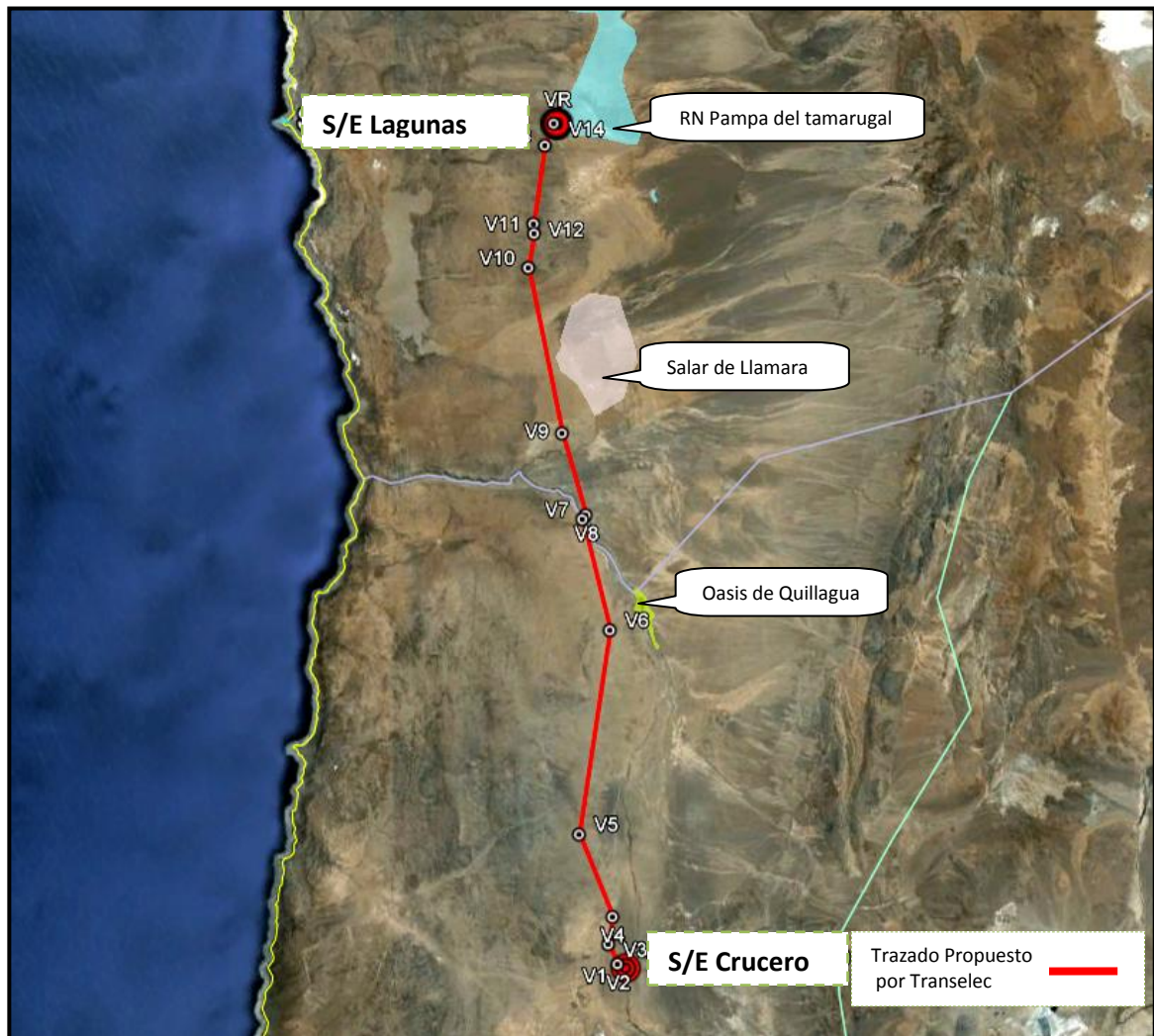


Figura 11: Trazado preliminar, propuesto por Transelec.
Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la subestación Lagunas, ésta se encuentra dentro de la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal (D.S. 531/67 Ministerio Relaciones Exteriores), sin embargo, las zonas con valor ambiental dentro de las reserva, es decir las zonas asociadas a presencia de tamarugo o algarrobo se encontrarían a más de 5 km de distancia del trazado propuesto por Transelec.

Respecto al valor ambiental del territorio, cobra relevancia el sector asociado al Salar de Llamara, por su alto valor por albergar estromatolitos, formaciones de relevancia a nivel mundial, como se muestra a continuación:



Figura 12: Salar de Llamará y tapetes microbianos
Fuente: Elaboración propia

Otro sector que cobra especial relevancia se relaciona con la sección del trazado que se emplaza cercano al sitio prioritario Oasis de Quillagua.



Figura 13: Localidad de Quillagua.
Fuente: Elaboración propia.

Para el componente flora y fauna el sector más importante corresponde al asociado al cruce del río Loa y quebrada Amarga, ya que el sector podría albergar especies en categoría de conservación.

Con respecto al componente económico se destaca la presencia de la empresa Soquimich (SQM) en la zona, tal como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 14: Sector explotación minera (SQM).
Fuente: Elaboración propia.

También se visitaron las zonas de emplazamiento de las subestaciones. A continuación se muestran imágenes de la subestación Lagunas (izquierda) y Crucero (derecha):



Figura 15: Subestación Lagunas y Subestación Crucero.
Fuente: Elaboración propia.

4.2 Normalización de la información geográfica

A continuación se presenta la información en formato *shape* considerada para el área de estudio. Posteriormente es transformada a formato *raster* mediante las herramientas de *Spatial Analysis* de *ArcGis 9.2*.

La información *raster* consideró pixeles de 400m^2 es decir de $20\text{x}20\text{m}$. Se utilizó este tamaño de pixel debido a que las torres eléctricas poseen una superficie promedio equivalente a este pixel y sería la mínima superficie donde éstas podrían emplazarse en terreno.

Tabla 3: Shape considerados para la dimensión física

Dimensión física			
Fuente	Contenidos	Nombre cobertura	Fecha
CONAMA	Erodabilidad	Erodabilidad.shp	2002
	Erosividad	Erosividad.shp	2002
	Vulnerabilidad de acuíferos	vulnerabilidad_acuiferos.shp	2002
DGA	Cuerpos de agua	cuerpos_aguas.shp	2003
	Drenaje	drenaje_dga.shp	2005
CONAF	Desertificación	desertificación.shp	2002
IGM	Curvas de nivel	curvas_de_nivel.shp	2005

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4: Shape considerados para la dimensión biótica

Dimensión biótica			
Fuente	Contenidos	Nombre cobertura	Fecha
CONAMA	Sitios prioritarios	24_SP_F30_QR312.shp	2005
	Pisos vegetacionales	pisos_luebert_pliscoff_2009_wgs84_19.shp	2009
	Red Áreas Protegidas Privadas	25_ASPPP_F14_QR295.shp	2005
	Zonas Húmedas de Importancia Internacional (Sitios Ramsar)	sitios_Ramsar.shp	2005
	SNASPE	snaspe_pre.shp	2005

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: *Shape* considerados para la dimensión cultural

Dimensión cultural			
Fuente	Contenidos	Nombre cobertura	Fecha
CONADI	Áreas de desarrollo indígena (ADI)	areas_desarrollo_indigena.shp	2008
CONAMA	Sendero de Chile	sendero_chile.shp	2008
SERNATUR	Zonas y Centros de Interés Turístico Nacional (ZOIT y CEIT)	zoit_ceit.shp	2008
MOP – BB.NN.	Sitios arqueológicos	sitios_arqueologicos.shp	2002

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: *Shape* considerados para la dimensión económica

Dimensión económica			
Fuente	Contenidos	Nombre cobertura	Fecha
IGM	Centros poblados	centros_poblados.shp	2005
	Aeródromos	aerodromos.shp	2005
	Ciudades	ciudades_nacional.shp	2005
	Vialidad Chile	vialchile.shp	2005

Fuente: Elaboración propia.

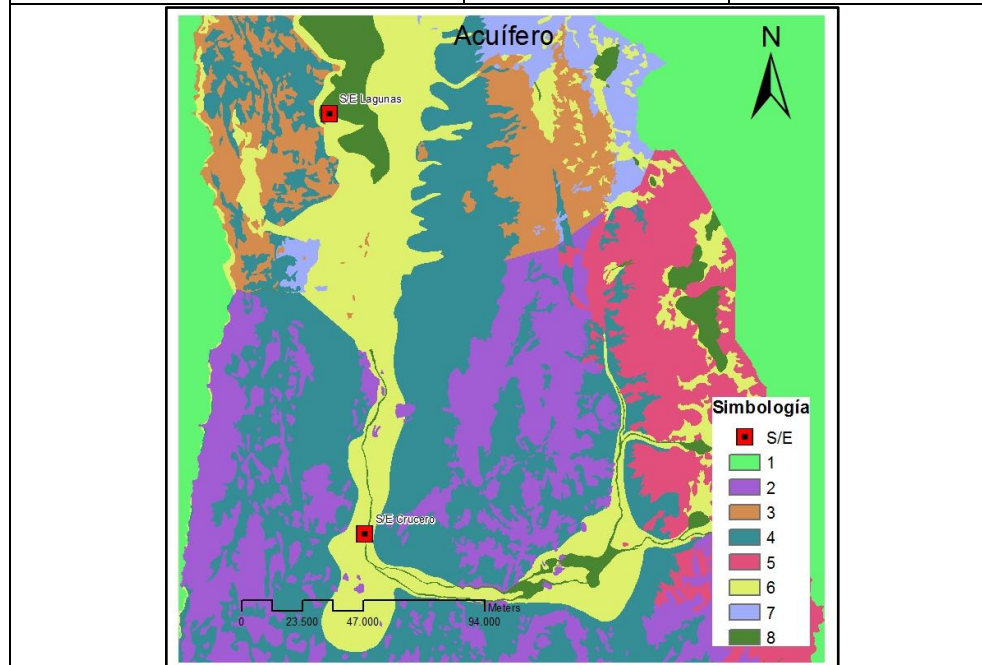
4.3 Valoración de capas de información ambiental

Se realizó la valoración de las capas de información ambiental de las distintas dimensiones ambientales, para lo cual se utilizaron los rangos definidos preliminarmente por los organismos estatales, como se muestra a continuación:

a) Valoración de la dimensión física

Tabla 7: Valoración vulnerabilidad de acuíferos

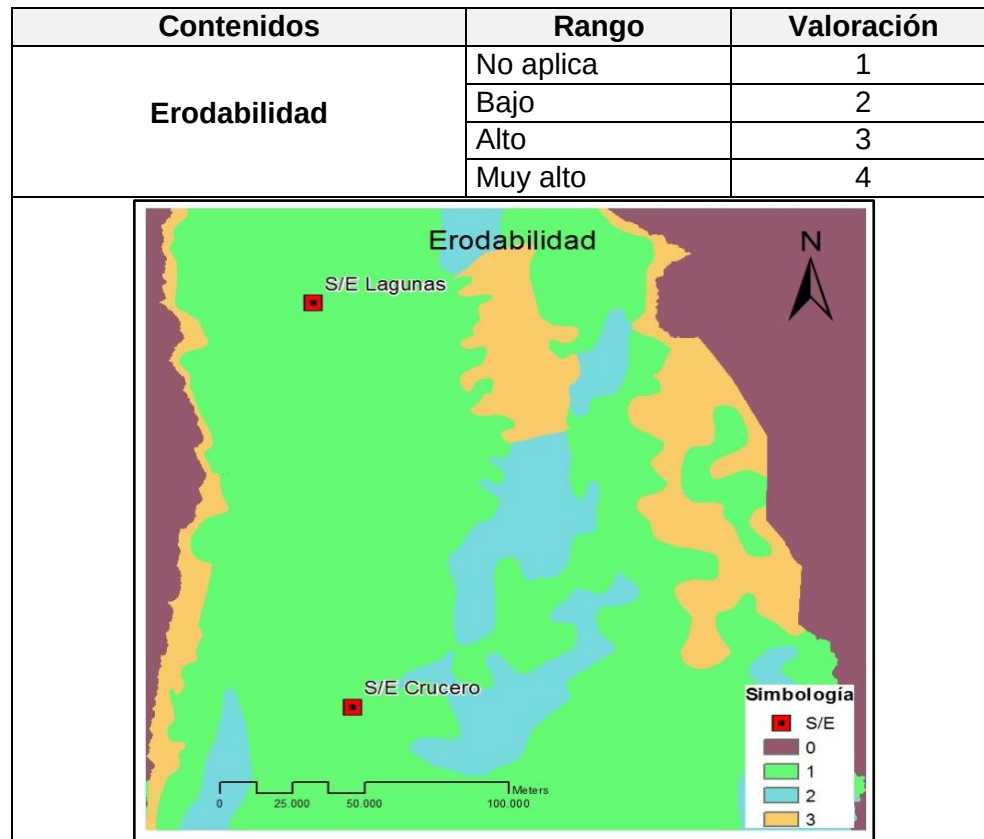
Contenidos	Rango	Valoración
Vulnerabilidad de acuíferos	No aplica	1
	Muy baja	2
	Muy baja roca	3
	baja	4
	Media/baja	5
	Media	6
	Media alta roca	7
	Alta	8



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8: Valoración de vulnerabilidad de acuíferos

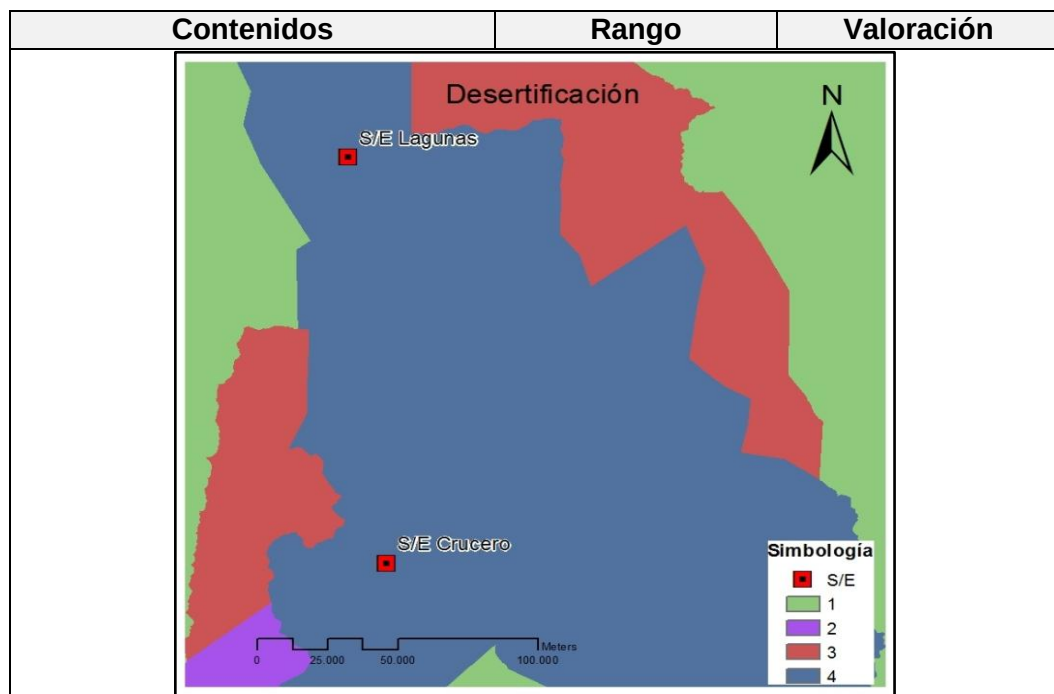
Tabla 9: Valoración de erodabilidad



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Valoración desertificación

Contenidos	Rango	Valoración
Desertificación	No afectada	1
	Leve	2
	Moderada	3
	Grave	4

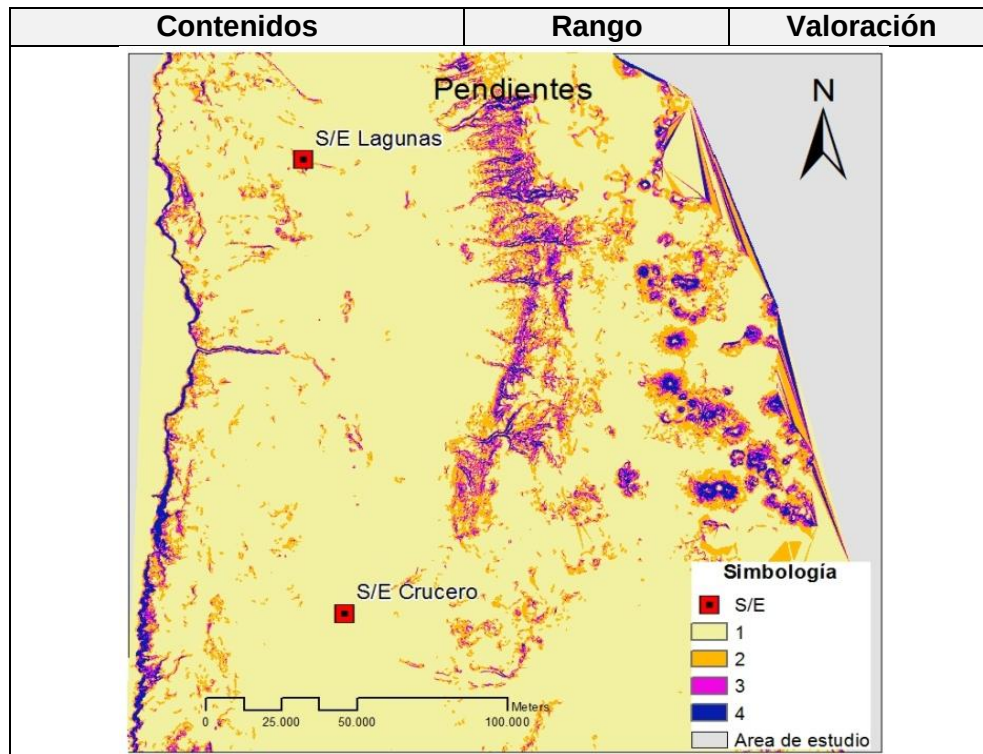


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las pendientes se utilizó la extensión *3D Analyst*, se creó un *TIN* con el *shape* de curvas de nivel y se reclasificaron las pendientes de acuerdo a los rangos que se muestra a continuación:

Tabla 11: Valoración de pendientes

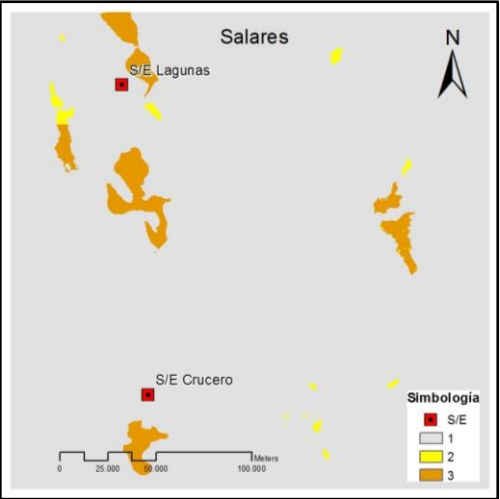
Contenidos	Rango	Valoración
Pendientes (Curvas de nivel)	0-15	1
	15-30	2
	30-45	3
	>45	4



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Valoración de salares

Contenidos	Rango	Valoración
Salares	No aplica	1
	Salares < 10000 ha	2
	Salares > 10000 ha	3

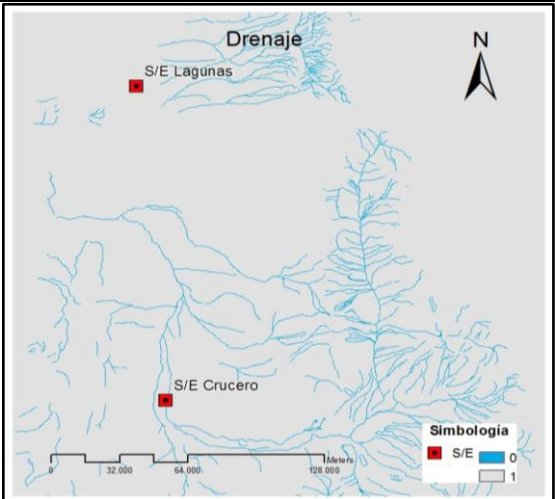


El mapa muestra la distribución de salares en una zona geográfica. Se identifican dos puntos de interés: 'S/E Lagunas' y 'S/E Crucero', marcados con un cuadrado rojo. El mapa está dividido en áreas coloreadas que representan diferentes niveles de valoración: amarillo para el nivel 1, naranja para el nivel 2 y rojo para el nivel 3. Incluye una escala en metros (0, 25.000, 50.000, 100.000) y una brújula indicando el norte (N). La leyenda 'Simbología' indica que el cuadrado rojo representa 'S/E' y los colores representan los niveles de valoración.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: Valoración del drenaje

Contenidos	Rango	Valoración
Drenaje	Existencia	0
	Ausencia	1



El mapa muestra la red de drenaje en una zona geográfica. Se identifican dos puntos de interés: 'S/E Lagunas' y 'S/E Crucero', marcados con un cuadrado rojo. El mapa está dividido en áreas coloreadas que representan diferentes niveles de valoración: azul para el nivel 0 y gris para el nivel 1. Incluye una escala en metros (0, 32.000, 64.000, 128.000) y una brújula indicando el norte (N). La leyenda 'Simbología' indica que el cuadrado rojo representa 'S/E' y los colores representan los niveles de valoración.

Fuente: Elaboración propia.

b) Valoración para la dimensión biótica

Tabla 14: Valoración de Sitios prioritarios y Áreas Silvestres Protegidas del Estado de Chile

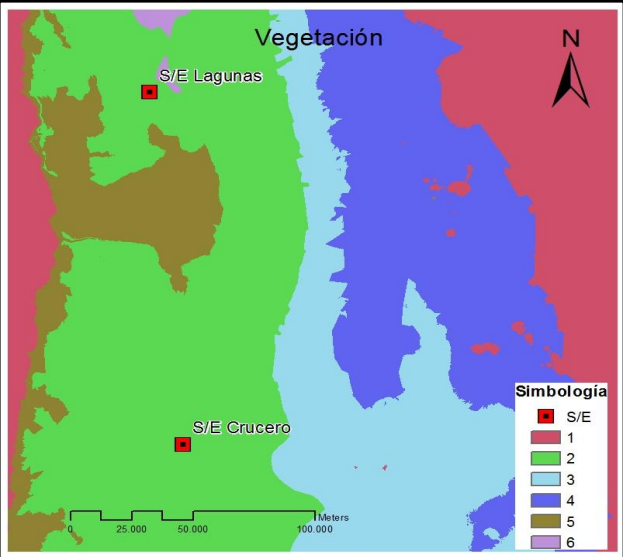
Contenidos	Rango	Valoración
Sitios prioritarios y Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE)	Sin presencia de sitios prioritarios	1
	Presencia de Sitios prioritarios	2
	SNASPE	3

El mapa muestra la distribución geográfica de los sitios prioritarios y áreas silvestres protegidas en Chile. Las zonas están coloreadas según su valoración: azul para la categoría 1, amarillo para la categoría 2 y rojo para la categoría 3. Se marcan dos puntos específicos: 'S/E Lagunas' y 'S/E Crucero'. El mapa incluye una escala en kilómetros (0, 25.000, 50.000, 100.000) y una brújula.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: Valoración de la vegetación

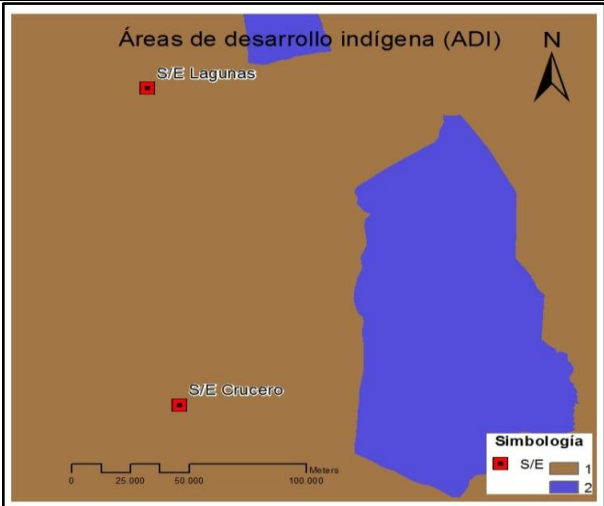
Contenidos	Rango	Valoración
Vegetación	Sin vegetación	1
	Desierto absoluto	2
	Matorral bajo desértico	3
	Matorral bajo de altitud	4
	Matorral desértico	5
	Bosque espinoso	6

Contenidos	Rango	Valoración
 Vegetación S/E Lagunas S/E Crucero Simbología - S/E 1 2 3 4 5 6		

Fuente: Elaboración propia.

c) Valoración de la dimensión cultural

Tabla 16: Valoración de áreas de desarrollo indígena

Contenidos	Rango	Valoración
Áreas de desarrollo indígena (ADI)	No aplica	1
	Alto el Loa	2
	Jiwasa Oraje	2
 Áreas de desarrollo indígena (ADI) S/E Lagunas S/E Crucero Simbología - S/E 1 2		

Fuente: Elaboración propia.

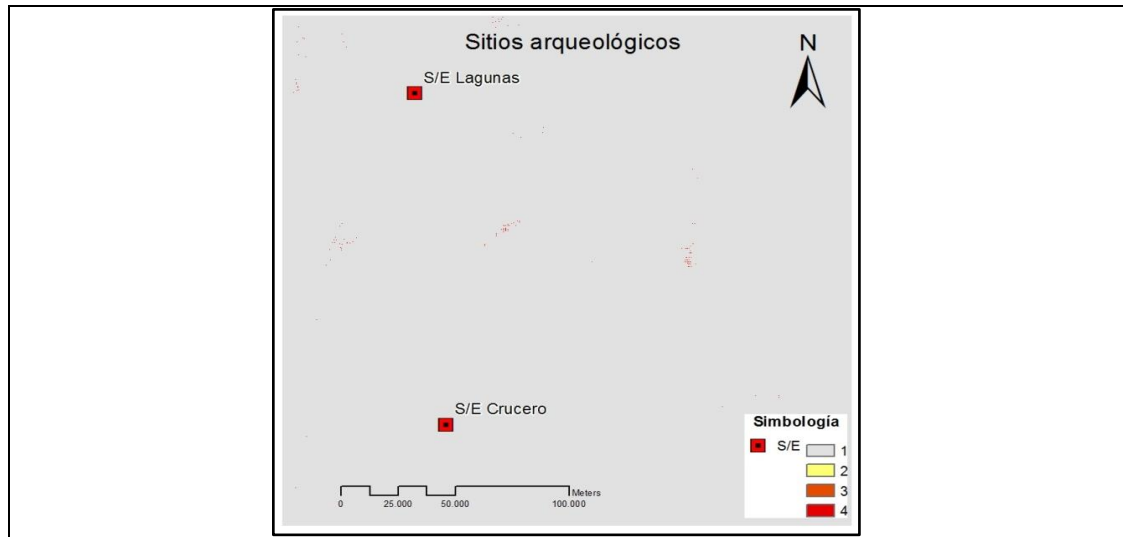
**Tabla 17: Valoración de Zonas y Centros de Interés Turístico Nacional
(ZOIT y CEIT pertenecientes al área de estudio)**

Contenidos	Rango	Valoración
Zonas y Centros de Interés	No aplica	1
Turístico Nacional (ZOIT y CEIT)	Presencia	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Valoración de sitios arqueológicos

Contenidos	Rango (sensibilidad)	Valoración
Sitios arqueológicos	S/I	1
	bajo	2
	medio	3
	alto	4



Fuente: Elaboración propia.

d) Valoración de la dimensión económica

Tabla 19: Valoración de aeródromos

Contenidos	Rango	Valoración
Aeródromos	No aplica	1
	Presencia	2

Aeródromos

S/E Lagunas

S/E Crucero

0 25 000 50 000 100 000 Meters

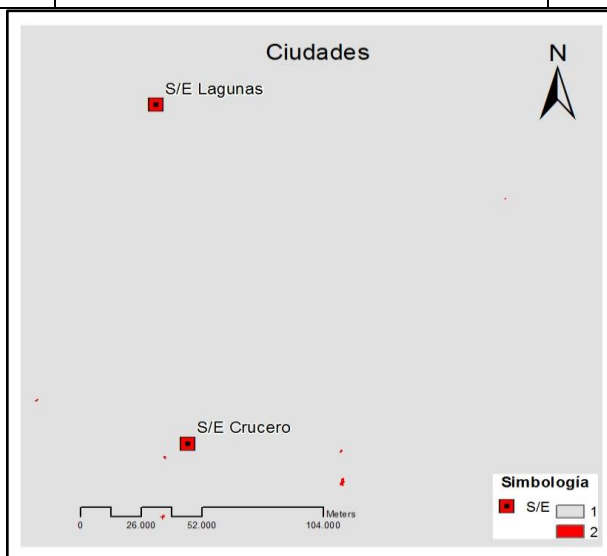
Simbología

S/E 1 2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20: Valoración de ciudades

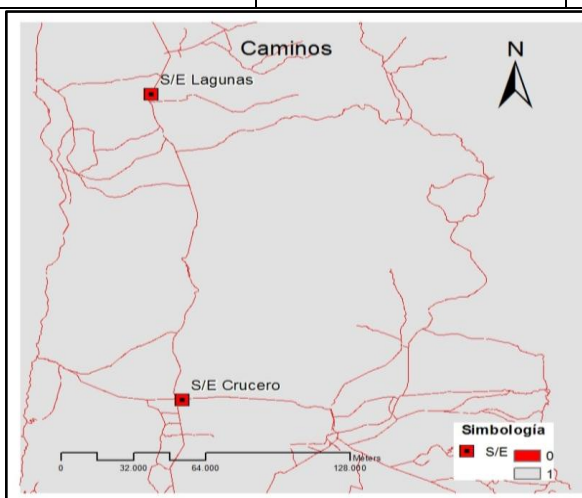
Contenidos	Rango	Valoración
Ciudades	No aplica	1
	Presencia	2



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21: Valoración de caminos

Contenidos	Rango	Valoración
Caminos	Existencia	0
	Ausencia	1



Fuente: Elaboración propia.

4.4 Suma de capas de información por dimensión ambiental

Ahora se procede a la suma o adición de las capas de información ambiental por cada una de las cuatro dimensiones ambientales. Utilizando la herramienta “*calculator raster*” se cuantifican las dimensiones ambientales para el área de estudio, sumando las capas de información.

a) Dimensión Física

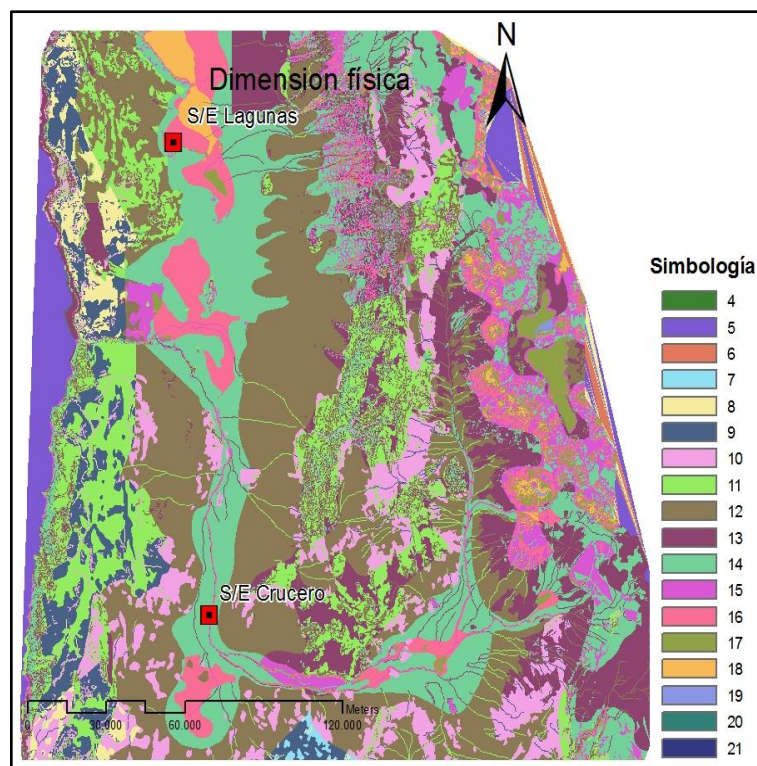


Figura 16: Dimensión Física (DF).
Fuente: Elaboración propia.

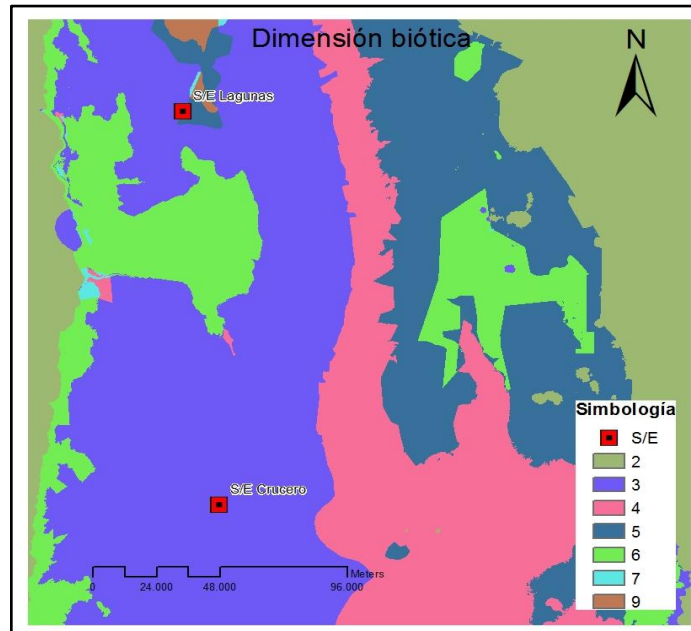


Figura 17: Dimensión Biótica (DB).
Fuente: Elaboración propia.

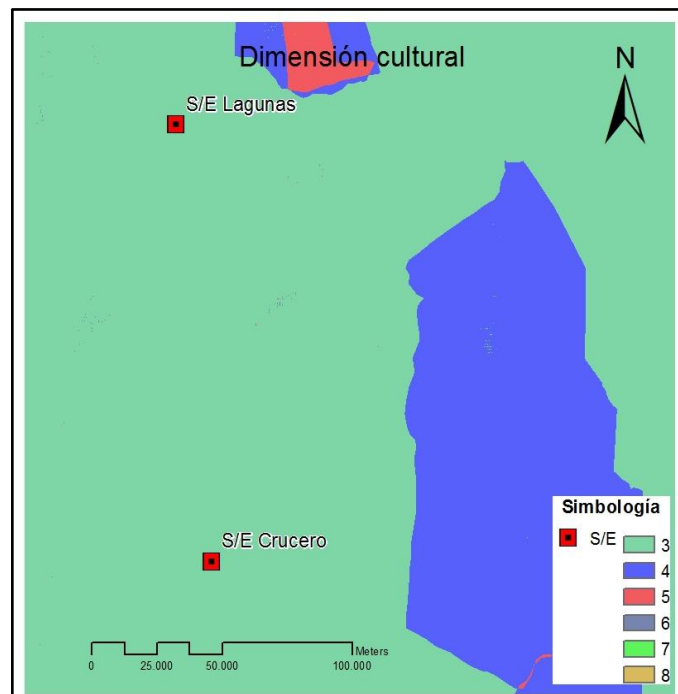


Figura 18: Dimensión Cultural (DC).
Fuente: Elaboración propia.

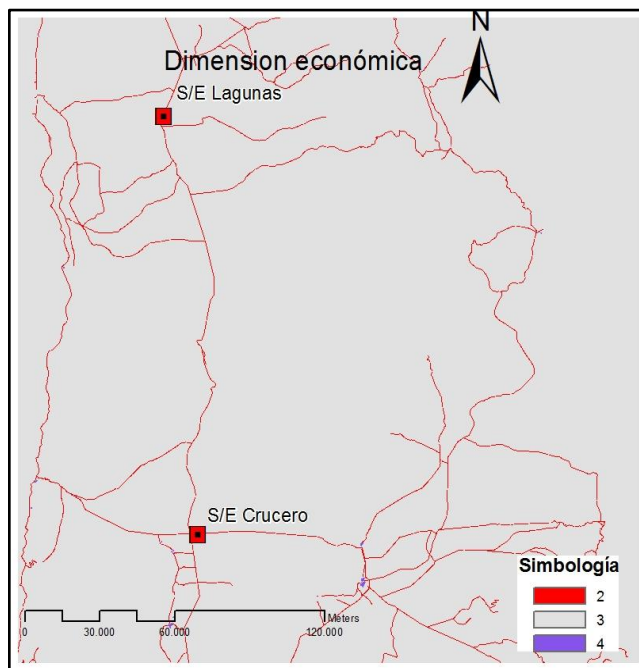


Figura 19: Dimensión Económica (DE).
Fuente: Elaboración propia.

4.5 Asignación de pesos específicos a las dimensiones ambientales

La asignación de los pesos específicos podría considerar mayor peso para la dimensión física y biótica, dado la características de la zona del área de estudio, como la presencia de salares y el río Loa, los que albergan la mayor diversidad biológica de la zona. Por otro lado la dimensión económica y cultural podría considerar asignar una menor ponderación dada la escasa población que existe, asociada más bien a las cercanías de cursos de agua, en este caso el río Loa.

El departamento de medio ambiente de la empresa Transelec participó en las respuestas del formulario, dado que se consideró que ellos eran los más adecuados para esta valoración. Para dicha valoración participaron 10 personas y se utilizó el siguiente formulario:

Tabla 22: Formulario para la aplicación del método método *Delphi*.

Encuesta Proyecto Crucero-Lagunas	
Descripción del proyecto	Ubicación y aspectos ambientales relevantes
El proyecto Crucero-Lagunas consiste en la construcción de una línea de transmisión eléctrica entre las subestaciones Crucero y Lagunas, actualmente existentes. El trazado inicial tiene una extensión aproximada de 168 km partiendo desde la S/E Lagunas hacia el sur.	Mapa satelital de la zona de estudio en el norte de Chile. Se muestran las subestaciones S/E Lagunas (norte) y S/E Crucero (sur). El trazado de la línea de transmisión eléctrica se indica con una línea roja. Se identifican varios oasis y reservas naturales: R.N. Pampa del Tamarugal, Salar de Llamara, OASIS OQUILLAGUA, Desembocadura del Río Loa, Alto Patache (Oasis de Ni), Pabellón de Pica (Oasis d), Punta Lobos (Oasis de Nie), Bahía Chipana, Alto Chipana (Oasis de Ni), Tocopilla, y María Elena.
Área de la empresa	
Profesión	
Años de experiencia	
Cargo	
Valoración ambiental del proyecto	
Dimensión	Peso (%)
Física	
Biótica	
Económica	
Cultural	
Valoración Total	100%

Fuente: Elaboración propia.

De la aplicación del *método Delphi* se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 23: Valoración de las dimensiones ambientales según método *Delphi*.

Dimensión ambiental	Encuestados										Promedios	Pesos (Wj)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Física	33	20	22	15	40	15	34	50	32	35	29,6	0,30
Biótica	45	20	30	10	23	45	20	40	30	25	28,8	0,29
Económica	10	20	28	20	27	10	20	5	28	5	17,3	0,17
Cultural	12	40	20	55	10	30	26	5	10	35	24,3	0,24
												1,00

Fuente: Elaboración propia

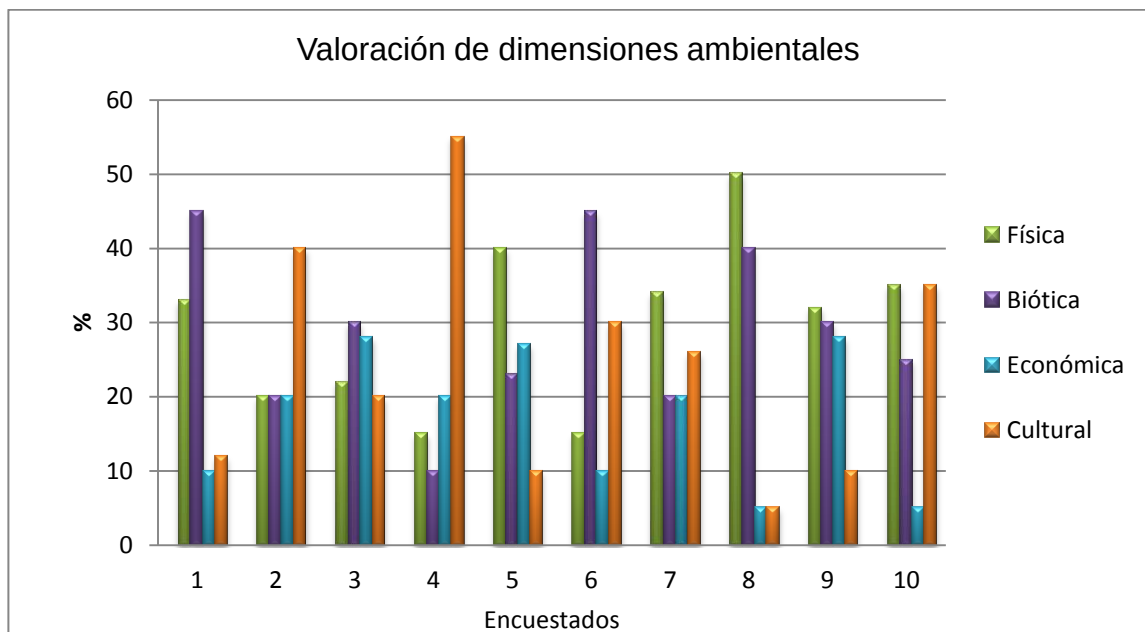


Gráfico 1: Gráfico resumen de valorización de dimensiones ambientales.

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Suma de dimensiones ambientales

Posteriormente se realiza la suma de las dimensiones ambientales ponderadas previamente por el peso específico de cada dimensión:

Fórmula 6:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j * v_{ij}$$

Donde:

r_i : El nivel de adecuación de la alternativa i

w_j : Es el peso del criterio j

v_{ij} : Es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j

Por lo tanto lo anterior quedaría de la siguiente forma:

$$r_i = DF*0,30 + DB*0,30 + DE*0,15 + DC*0,25$$

$\sum$ DIMENSIONES AMBIENTALES = DF*0,30 + DB*0,29 + DE*0,17 + DC*0,24

Donde:

r_i : El nivel de adecuación de la alternativa i

DF : Dimensión física

DB : Dimensión biológica

DE : Dimensión económica

DC : Dimensión cultural

Utilizando la herramienta *raster calculator* de *spatial Analyst* de *ArcGis*, se calcula la expresión anterior, dando como resultado el siguiente archivo *raster*:

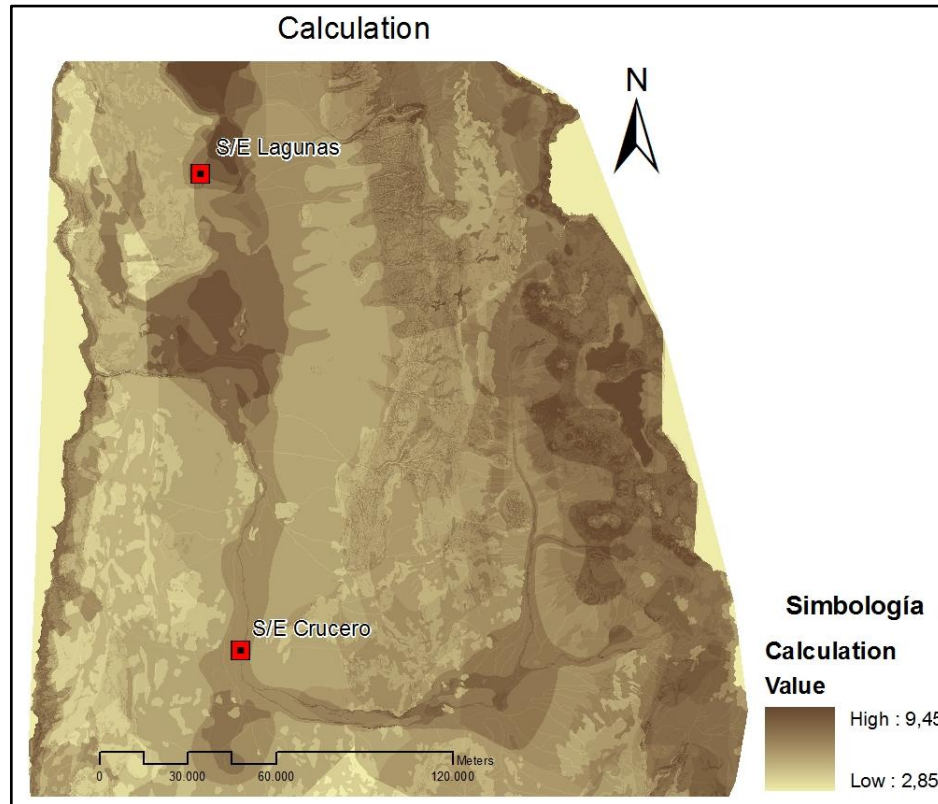


Figura 20: Suma de dimensiones ambientales.
Fuente: Elaboración propia.

4.7 Determinación de matriz de costos acumulados

Utilizando la extensión *Spatial Analyst* de *ArcGis*, específicamente con las herramientas de *Cost Weighted* se calcula la matriz de costos acumulados entre ambas subestaciones.

La función de costo ponderado (*cost-weighted*) modifica la distancia euclidiana al equiparar la distancia con un factor como el costo de viajar a través de cualquier celda dada. Esta función encuentra el menor costo acumulado desde una celda a otra celda próxima. El costo en este caso es el peso total de las dimensiones ambientales.

Aplicando las herramientas de *ArcGis* y el procedimiento antes descrito, se generan dos archivos *raster* uno de costo ponderado (*cost-weighted*) y de dirección (*Cost weighted direction*), tal como se muestra a continuación:

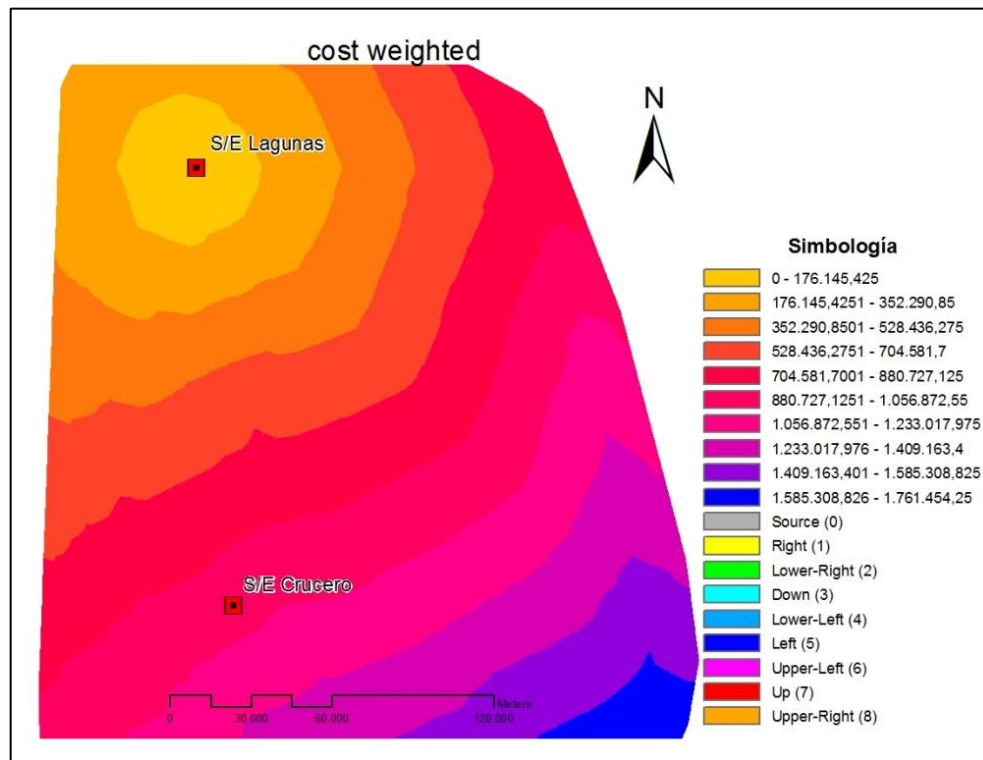


Figura 21: Raster de costos acumulados (*cost-weighted*).
Fuente: Elaboración propia.

Este archivo *raster* corresponde a una matriz de costos acumulados (*cost-weighted*), es decir los costos acumulado desde una celda a otra celda próxima, la cual es utilizada finalmente para la determinación del emplazamiento del trazado en las celdas de menor costo acumulado y por lo tanto de mínimo impacto ambiental.

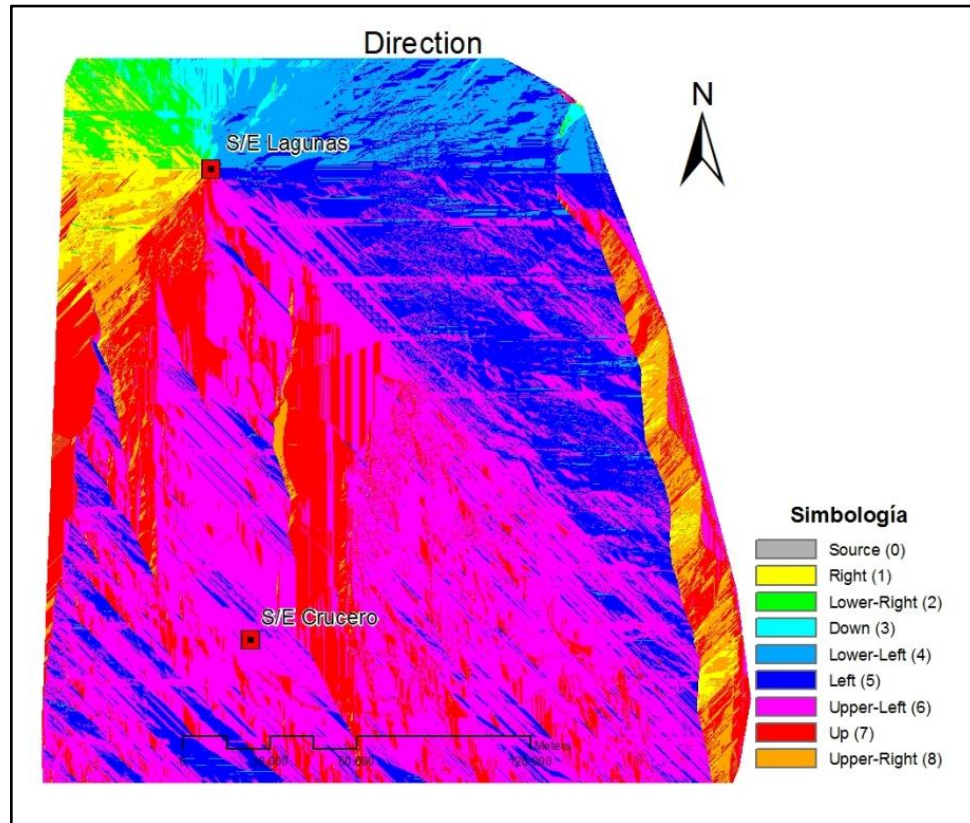


Figura 22: Raster de dirección (*Cost weighted direction*).
Fuente: Elaboración propia.

El archivo *raster* denominado *Cost weighted direction* es la trama de dirección la cual proporciona una hoja de ruta. Es la identificación de la ruta a seguir desde cualquier celda, a lo largo de la ruta de menor costo, de vuelta a la fuente más cercana.

El algoritmo para calcular la dirección de la trama asigna un código a cada celda que identifica que una de sus celdas vecinas está en el camino de menor coste de vuelta a la fuente más cercana. El código es una secuencia de números enteros de 0 a 8. El valor 0 se utiliza para representar las ubicaciones de origen. Los valores de 1 a 8 codifican la dirección en sentido horario a partir de la derecha.

4.8 Cálculo de ruta de menor costo acumulado

Posteriormente con la herramienta *Shortest Path* se calcula la ruta de menor costo entre las dos subestaciones. El punto de origen es la subestación Lagunas y el de destino es la subestación Crucero. El resultado se presenta en la siguiente figura:

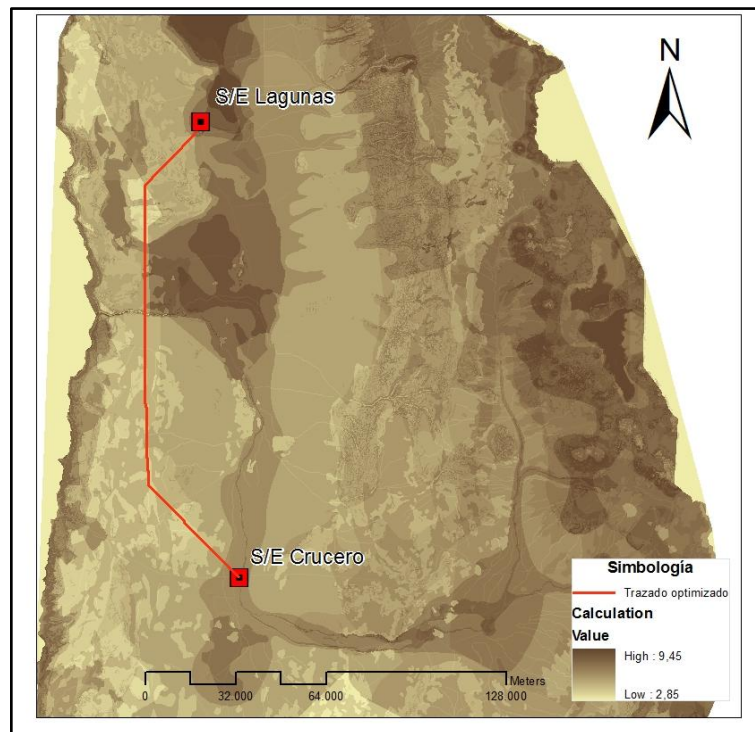


Figura 23: Trazado optimizado mediante *Shortest Path*.
Fuente: Elaboración propia.

Gráficamente se aprecia que el trazado propuesto se emplaza en zonas de menor valor ambiental, zonas de color “más claro” cercanas a un valor ponderado “low”.

La optimización que entrega el software está basado en el algoritmo Dijkstra, el cual utilizando la matriz de costos Origen-Destino entrega la solución optima de la ruta más corta.

CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Comparación de trazado propuesto y optimizado

Con respecto a los resultados de la optimización ambiental, el trazado resultante de la aplicación de la metodológica (trazado color rojo) entrega un trazado que minimiza los efectos e impactos sobre el medio ambiente ya que evita las zonas “más oscuras” o con mayores pesos en la matriz de costos acumulados según se observa en la siguiente figura:

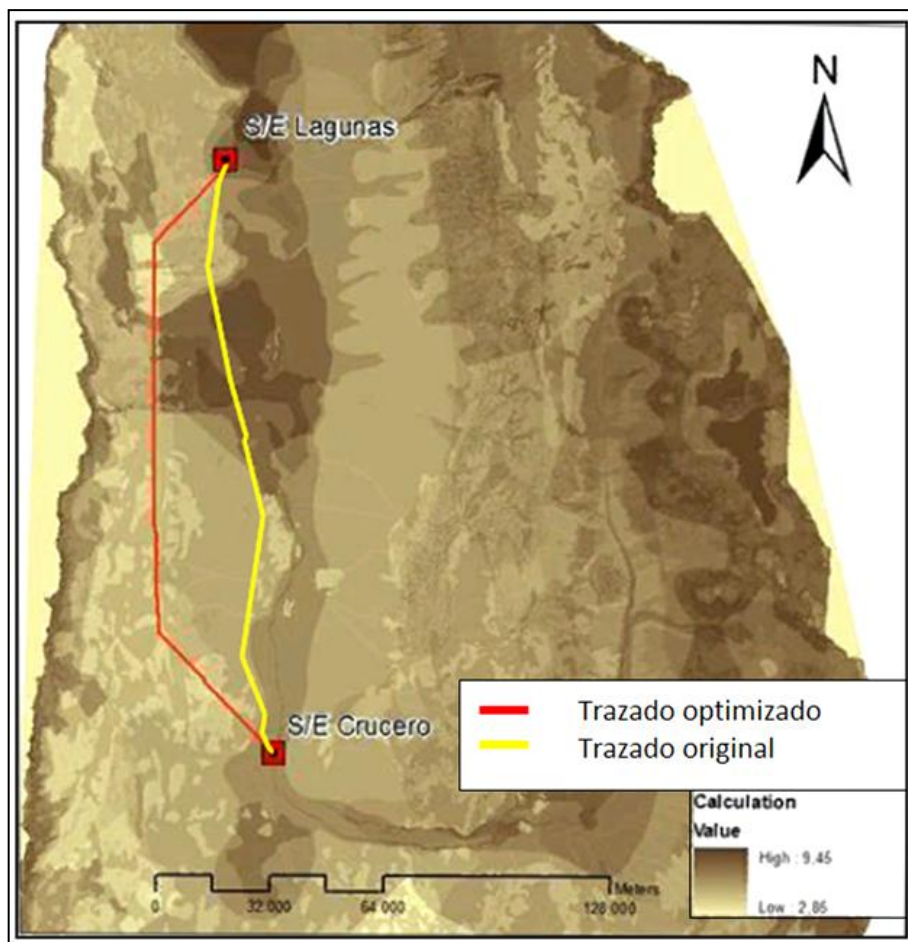


Figura 24: Trazado optimizado v/s trazado original.
Fuente: Elaboración propia.

De los puntos ambientalmente más sensibles como el Oasis de Quillagua y el Salar de Llamará el trazado se aleja varios kilómetros de distancia, así también con los puntos más sensibles de vegetación como la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal, que si bien la subestación Lagunas se emplaza dentro de la reserva, se minimiza la afectación de esta, disminuyendo la longitud de intervención.

5.2 Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad³ se utilizarón distintas ponderaciones de las dimensiones ambientales, considerando para los 3 primeros casos una ponderación mayor de los temas más sensibles en la zona como el medio físico y el biótico. El cuarto caso consideró una mayor ponderación de las dimensiones económica y cultural, pero dada la zona de emplazamiento del proyecto esta posee escasa relevancia, como las anteriores valoraciones de dimensiones ambientales, a continuación se muestra la tabla que resume las ponderaciones utilizadas:

Tabla 24: Valoración de dimensiones ambientales

Dimensión	Código	PESOS			
		Caso N° 1	Caso N° 2	Caso N° 3	Caso N° 4
Física	DF	0,30	0,25	0,50	0,10
Biótica	FB	0,29	0,25	0,20	0,10
Económica	DE	0,17	0,25	0,15	0,40
Cultural	DC	0,24	0,25	0,15	0,40

Fuente: Elaboración propia.

³ Ver ANEXO I. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

Del análisis de sensibilidad se observa que en los tres primeros casos analizados el trazado es similar, sólo se diferencia en la salida de la subestación Lagunas y en la llegada a la subestación Crucero, en cambio para el caso N°4 donde la ponderación mayor corresponde a la económica y cultural (80%) el trazado cambia y se acerca en dirección este, tal como se observa en las siguientes figuras:

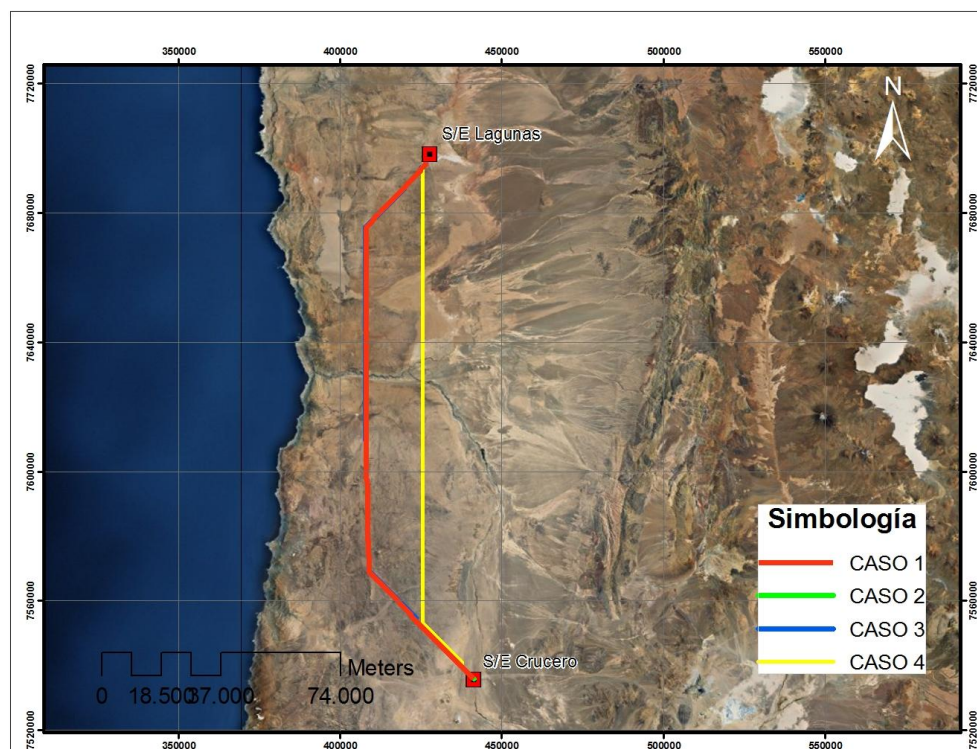


Figura 25: Comparación de 4 casos analizados.
Fuente: Elaboración propia.

Se aclara que dado la escala de la figura, los casos 1, 2 y 3 se aprecian en una única línea roja.

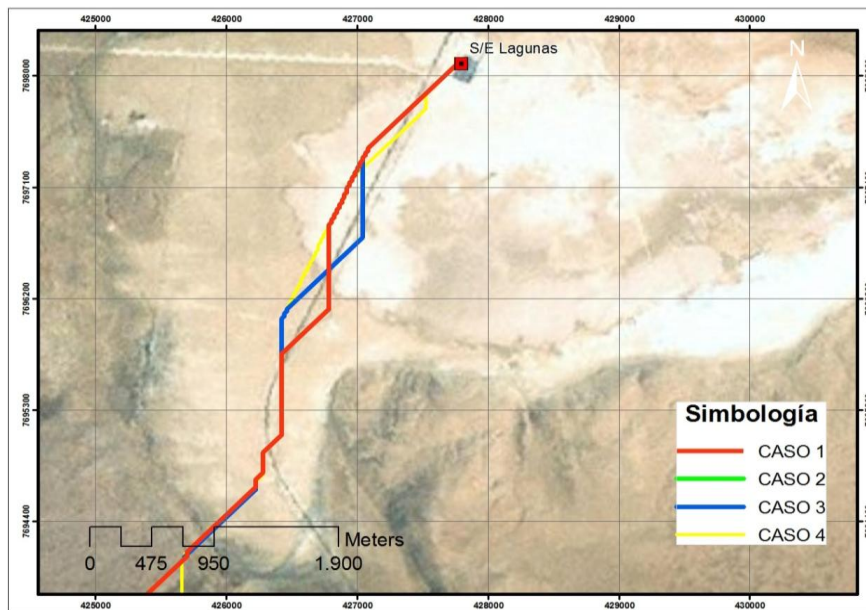


Figura 26: Comparación de 4 casos analizados, salida de subestación Lagunas.
Fuente: Elaboración propia.

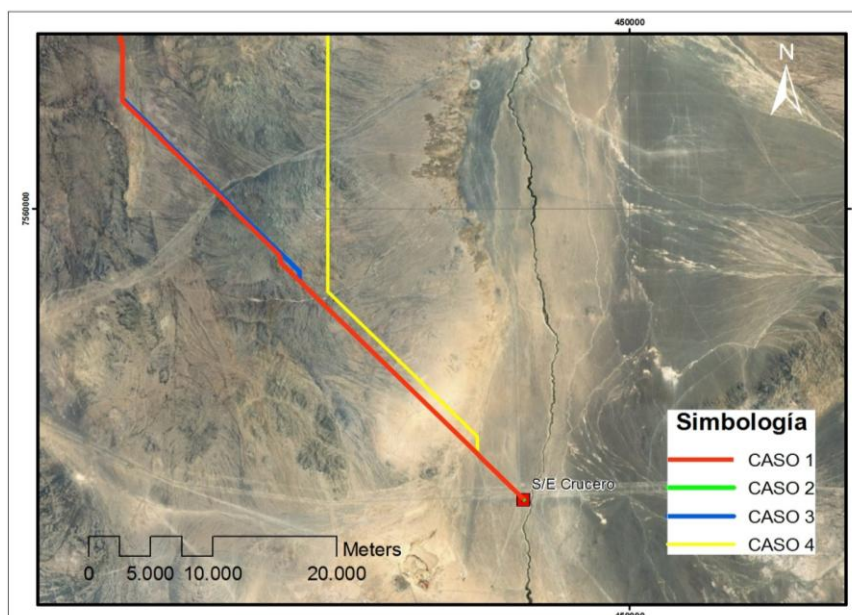


Figura 27: Comparación de 4 casos analizados, llegada a subestación Crucero.
Fuente: Elaboración propia.

5.3 Valorización de impactos ambientales de trazado propuesto y optimizado

A continuación se valorizarán los impactos ambientales de la alternativa de trazado original versus la optimizada ambientalmente, dicha valorización se fundamenta en la matriz de Leopold (1971) que consiste en un cuadro de doble entrada cuyas columnas están encabezadas por una relación de factores y sus filas por otra relación de causa de impacto.

Los criterios y variables utilizados en el proceso de valoración de impactos son los siguientes:

Carácter del impacto: puede ser positivo, negativo o neutro, dependiendo de su relación con la condición basal del área de influencia del proyecto. Por su naturaleza cualitativa se identifican los impactos con los símbolos (+) para positivos, (-) para negativos y (*) para neutros.

Magnitud del impacto: este criterio corresponde a la síntesis de cinco condiciones (variables) relevantes de los impactos ambientales, y se determina mediante la sumatoria de los valores asignados a cada variable. Los rangos de magnitud oscilan entre 0 y 14, con una relación directamente proporcional entre este valor y la magnitud del impacto en el medio ambiente. Las variables consideradas son:

Probabilidad de ocurrencia: indica la probabilidad de que el impacto se manifieste, y se califica en:

- Poco probable (0) Baja probabilidad de manifestación
- Probable (1) Existen expectativas razonables de ocurrencia
- Cierta (2) Impacto con 100% de probabilidad de ocurrencia.

Extensión: condición que identifica la manifestación espacial del impacto. Hace referencia tanto a relaciones de distancia como al alcance superficial del impacto. Se califican en:

- Reducida (0) Escasa cobertura espacial.
- Media (1) Cobertura espacial de rango mediano en relación con área de influencia.
- Amplia (2) Cuando el impacto afecta una porción significativa del área de influencia.

Intensidad: se refiere al grado de alteración que el impacto genera en uno o más componentes ambientales. Se califica tomando como referencia la condición basal y/o los estándares y normas de calidad ambiental cuando existen. La intensidad se califica como:

- Baja (0) El nivel de alteración de condición basal es de escasa relevancia.
- Moderada (2) La alteración es medianamente significativa. En el caso de los impactos negativos, corresponden a aquellos casos que caen dentro de rangos aceptables.
- Alta (4) La alteración es significativa. En el caso de los impactos negativos, corresponden a aquellos casos donde el grado de alteración deja de ser aceptable o se sobrepasan las normas.

Duración: establece la cantidad de tiempo que se manifiesta el impacto. Es equivalente al concepto de persistencia temporal. Se califican como:

- Fugaz (0) Impactos de corta duración (menos de un año) y por lo general asociados a la duración de la acción que los genera. (Ej. Fase de construcción).

- Temporal (1) Duración de uno a diez años. Generalmente se mantienen un tiempo luego de terminada la acción generadora.
- Permanente (2) Duración superior a diez años.

Reversibilidad: Indica la posibilidad de recuperación de la condición basal luego de un impacto. Se califica como:

- Reversible (0) Impactos que recuperan la condición basal en forma natural y dentro de los rangos de tiempo característicos del sistema.
- Recuperable (2) Impactos que pueden ser revertidos con intervención por acciones correctoras.
- Irreversible (4) Cuando no es posible la recuperación de la condición basal.

Ponderación de impactos ambientales:

Para efectos de las conclusiones generales de la evaluación, los impactos se agrupan según su magnitud de la siguiente forma:

- Impactos Bajos 0 a 4
- Impactos Moderados 5 a 10
- Impactos Significativos 11 a 14

A continuación se procede a la aplicación de la matriz de *Leopold* para la valoración de los impactos ambientales del trazado original propuesto por Transelec:

Tabla 25: Valoración de impactos ambientales del trazado original

Trazado propuesto originalmente (A)							
Impacto ambientales	P	E	I	D	R	M	Magnitud de los impactos
Pérdida o degradación de suelo	2	1	2	0	2	7	Moderado
Alteración de la vegetación nativa	1	1	0	0	2	4	Bajo
Alteración de fauna por alteración de su hábitat	1	1	0	0	2	4	Bajo
Deterioro ambiental de un área protegida	2	2	4	1	4	13	Significativo
Alteración de cursos de agua	2	1	1	0	2	7	Moderado
Modificación o alteración de costumbres humanas	1	0	1	1	0	3	Bajo
Fragmentación de hábitats y pérdida de biodiversidad	2	1	1	1	4	6	Moderado

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- **P:** Probabilidad de ocurrencia (0,1, 2)
- **E:** Extensión (0,1, 2)
- **I:** Intensidad (0, 2 ,4)
- **D:** Duración (0,1, 2)
- **R:** Reversibilidad (0, 2, 4)
- **M:** Magnitud del impacto (suma de variables. entre 0 y 14)
- **Impactos Bajos:** 0 a 4
- **Impactos Moderados:** 5 a 10
- **Impactos Significativos:** 11 a 14

A continuación se procede a la aplicación de la matriz de *Leopold* para la valoración de los impactos ambientales del trazado original y el optimizado:

Tabla 26: Valoración de impactos ambientales del trazado optimizado.

Trazado optimizado ambientalmente (B)							
Impacto ambientales	P	E	I	D	R	M	Magnitud de los impactos
Pérdida o degradación de suelo	1	1	1	0	0	3	Bajo
Alteración de la vegetación nativa	1	1	0	0	0	2	Bajo
Alteración de fauna por alteración de su hábitat	1	1	0	0	0	2	Bajo
Deterioro ambiental de un área protegida	2	2	1	1	2	8	Moderado
Alteración de cursos de agua	1	0	1	0	0	2	Bajo
Modificación o alteración de costumbres humanas	1	0	1	1	0	3	Bajo
Fragmentación de hábitats y pérdida de biodiversidad	1	1	0	1	0	3	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- **P:** Probabilidad de ocurrencia (0,1, 2)
- **E:** Extensión (0,1, 2)
- **I:** Intensidad (0, 2 ,4)
- **D:** Duración (0,1, 2)
- **R:** Reversibilidad (0, 2, 4)
- **M:** Magnitud del impacto (suma de variables, entre 0 y 14)
- **Impactos Bajos:** 0 a 4
- **Impactos Moderados:** 5 a 10
- **Impactos Significativos:** 11 a 14

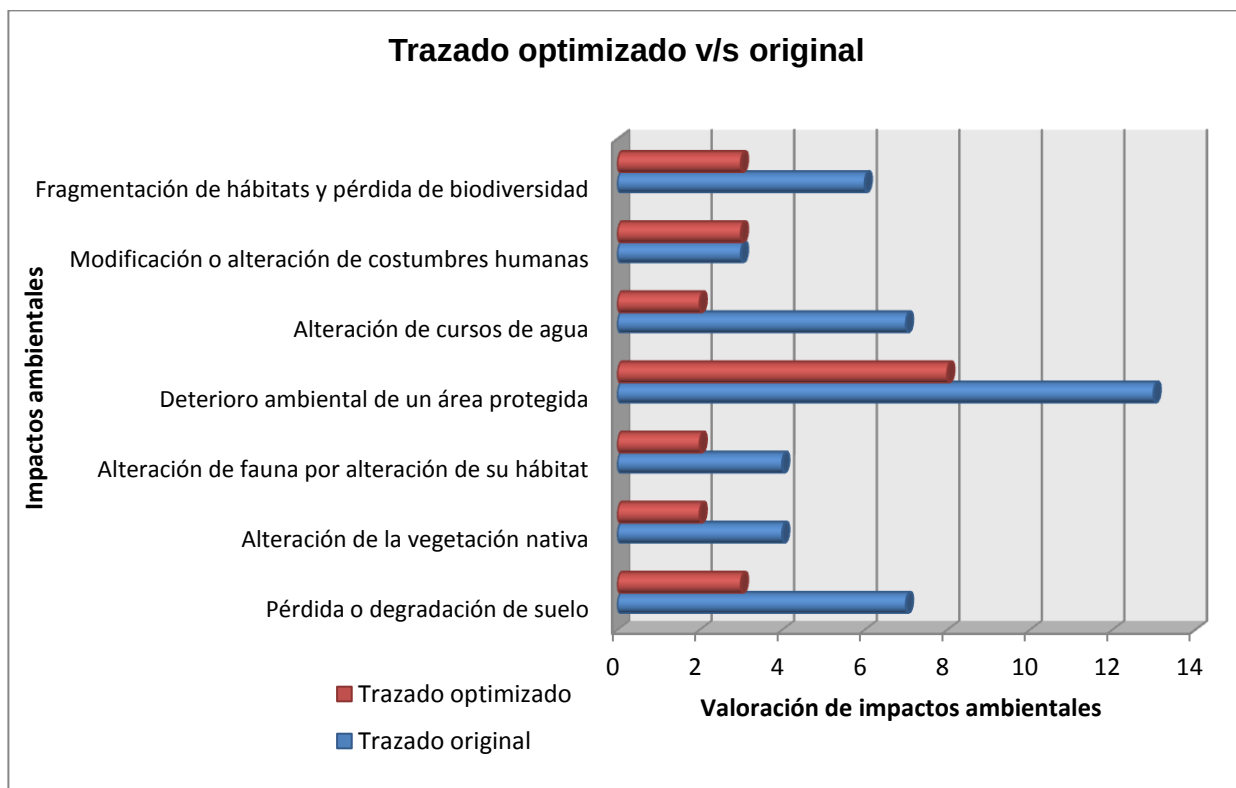


Gráfico 2: Trazado optimizado v/s trazado original.
Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en el gráfico anterior, que según la cuantificación y valoración de impactos, éstos son menores en magnitud del trazado optimizado versus el trazado original.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La propuesta metodológica tiene aplicación en los procesos de toma de decisiones para la localización de proyectos lineales, por cuanto se utiliza la información de ecosistemas y comunidades que pueden verse afectados por impactos ambientales, dicha información en algunos casos es incompleta, no cuantificable o de difícil adquisición por lo que la metodología en primera instancia consideró la búsqueda y recopilación de la máxima cantidad de información de la zona de estudio.

Con respecto a la hipótesis general planteada donde la realización de una metodología de optimización ambiental de trazados de transmisión eléctrica minimizará los impactos sobre el medio ambiente, optimizando la toma de decisiones, es posible afirmar que ésta metodología cumple con la optimización ambiental disminuyendo los impactos ambientales, con respecto del trazado original sin optimización.

En lo referente a las hipótesis específicas, se puede mencionar que la metodología aplicada en un caso real disminuye los impactos ambientales, genera una alternativa que es factible de materializar entre las subestaciones existentes Lagunas y Encuentro y además mejora la toma de decisiones en función de las variables y aspectos ambientales más relevantes y sensibles del área de estudio.

El objetivo general de la tesis fue diseñar una metodología de optimización ambiental de trazados de transmisión eléctrica, considerando restricciones ambientales asociadas al medio físico, biótico, sociocultural y económico, dicho objetivo se logra con la integración entre la Lógica Difusa, el

Análisis Multiobjetivo y los Sistemas de Información Geográfica SIG, permitiendo la integración de estas herramientas para ser utilizadas en los procesos de toma de decisiones, minimizando el riesgo de tomar decisiones equivocadas.

Entre los objetivos específicos de optimizar la toma de decisiones y la elección de alternativas de trazados de líneas eléctricas que disminuyan los impactos y efectos sobre el medio ambiente, se cumple dado que se logra una mejor gestión ambiental, disminuyendo los impactos sobre el medio ambiente en la zona de estudio, generando alternativas de proyectos ambientalmente más factibles de materializar.

Los impactos ambientales fueron evaluados mediante la matriz de *Leopold*, la que es ampliamente utilizada en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) chileno. De dicha evaluación se logró verificar que la metodología empleada disminuyó en magnitud la mayoría de los impactos ambientales identificados, siendo adecuada para resolver la cuantificación y valoración ambiental de proyectos de inversión, por cuanto los impactos son menores para el trazado eléctrico producto de la aplicación de la metodología.

El objetivo de aplicar la metodología en un caso real y evaluar sus resultados se logra por medio de la aplicación de la metodología propuesta a un proyecto de transmisión eléctrica entre las subestaciones Laguna y Crucero existentes, en la zona norte del país. La metodología en este sentido es adecuada para proyectos lineales que involucran grandes superficies afectadas, ya que integra los sistemas de información geográfica con capacidades de análisis de grandes extensiones de territorio.

Con respecto a la utilidad de la metodología planteada, se puede mencionar que entrega en primera instancia una buena aproximación e identificación de los aspectos ambientales relevantes en la zona de estudio, lo cual es de gran utilidad para poder comparar el trazado optimizado ambientalmente con aspectos constructivos, ingeniería, costos y accesibilidad, los que finalmente deben ser ponderados para encontrar el punto de inflexión que satisfaga las expectativas del tomador de decisiones.

La metodología propuesta permitió integrar los sistemas de información geográfica, utilizando con éxito herramientas de análisis espacial conjuntamente con la información recopilada de las distintas fuentes de información, siendo el formato *raster* bastante útil al momento de realizar cálculos que involucran variables ambientales, en las cuatro dimensiones ambientales consideradas.

El cálculo de la ruta óptima usando las herramientas SIG, demostraron ser una herramienta útil para resolver problemas de localización y emplazamiento de este tipo de proyectos lineales, los cuales al tener una gran extensión, hacen difícil el manejo de gran cantidad de información espacial, dada la extensa cantidad de variables ambientales involucradas en el análisis.

El empleo de la ruta de mínimo costo acumulado genera una única solución al problema planteado, solución que, desde el punto de vista técnico, puede parecer demasiado rígida, pero al otorgar distintas ponderaciones a las dimensiones ambientales, esta solución se flexibiliza, dado que se pueden obtener varias alternativas de trazado dependiendo de las valoraciones consideradas para la realización de los cálculos.

Con respecto al análisis del trazado propuesto por Transelec versus el trazado optimizado ambientalmente, este último presentó una menor cuantificación y valoración de impactos, siendo estos menores en magnitud, según la valoración de matriz de *Leopold*.

El análisis de sensibilidad realizado permitió inferir que los pesos de la valorización de las dimensiones ambientales cobran relevancia al momento analizar el trazado del proyecto a una escala de detalle, variando entre un caso y otro en algunos sectores, pero no cambiando mayormente en la definición de la zona de emplazamiento del trazado optimizado.

Finalmente la metodología no resulta compleja en su aplicación, ya que cada uno de los ocho puntos que la componen, se encuentran bien definidos y acotados, por lo que resulta fácilmente aplicable, siendo una herramienta más bien sencilla de implementar.

6.2 Recomendaciones

Entre las recomendaciones se puede mencionar que para una adecuada aplicación de la metodología propuesta, es necesario considerar a lo menos una visita a terreno, pues entrega mayores herramientas al tomador de decisiones, otorgando aspectos importantes para identificar los sectores más sensibles desde el punto de vista ambiental y que debieran considerarse con mayor ponderación dentro de la metodología, lo cual debe verse reflejado en la ponderación y asignación de pesos específicos a las dimensiones ambientales, es decir es un punto importante dentro de la metodología propuesta.

La metodología es flexible y no restringe al tomador de decisiones a que tenga definidos pesos de importancia, ya que estos pueden ser incorporados a las dimensiones ambientales de acuerdo a los pesos específicos determinados por el tomador de decisiones, considerando siempre los criterios ambientales que mejor se ajusten a la zona de estudio.

En este sentido es importante la valoración de los ponderadores de las dimensiones ambientales mediante el método *Delphi*, el cual entrega la valorización más adecuada dentro de la metodología propuesta.

Otro punto importante a considerar es el análisis de sensibilidad, el cual asigna distintas valoraciones a las dimensiones ambientales, lo cual permite identificar que independiente de la valoración, el resultado del trazado tiende a emplazarse en los mismos sectores, variando la cantidad de quiebres o vértices del trazado y por consiguiente también variando la longitud final de la línea de transmisión eléctrica.

La metodología propuesta es de carácter general por lo que tiene una alta aplicabilidad no sólo en proyectos de transmisión de energía eléctrica, sino también en muchos otros proyectos lineales como son las carreteras, los

acueductos, los oleoductos, entre otros, que requieren de un análisis previo con el fin de disminuir los impactos ambientales.

La zona de estudio consideró la zona norte del país, en la cual los componentes ambientales relevantes están asociados a la presencia de salares y ríos los que albergan la mayor diversidad biológica de la zona, además de elementos patrimoniales, de infraestructura y uso del suelo. Para otras zonas del país las ponderaciones de las dimensiones ambientales podrían cambiar dependiendo de las condiciones naturales del sector de emplazamiento del proyecto, las cuales podrían corresponder a por ejemplo la presencia de bosque nativo y la presencia de especies vegetales en categoría de conservación, lo que debería ser ponderado y luego evaluado por el tomador de decisiones.

Los distintos escenarios a los que actualmente son sometidos los proyectos de inversión en el país, hacen necesaria la evaluación previa de los impactos ambientales, para los cuales surge la necesidad de justificar fundadamente el porqué del emplazamiento del proyecto en determinada zona, por lo que ésta metodología se muestra como una herramienta para justificar la localización o por el contrario cambiar la ubicación de proyectos de inversión, con el fin de disminuir los impactos ambientales sobre el medio ambiente.

Con respecto a los cálculos realizados, uno de los más complejos y demorosos en el procesamiento de datos, es la determinación de la matriz de costos acumulados, dicha matriz estima los costos acumulados desde el origen a todas las celdas del área de estudio, por lo que el procesamiento de los datos requiere de un tiempo considerable para la obtención del resultado deseado, por lo tanto, es recomendable el uso de computador con hardware adecuado.

Un punto importante a considerar dentro del análisis ambiental del emplazamiento de proyectos de inversión es el tiempo y costos de evaluar proyectos que están en una etapa de ingeniería preliminar y por lo tanto no se

cuenta con mayores antecedentes de detalle, para lo cual la metodología se adapta bastante bien a la información disponible, la cual considera información básica de proyectos, como el punto de origen y destino del trazado eléctrico (ambas subestaciones) y un trazado preliminar de la empresa Transelec.

Desde el punto de vista económico, la metodología propuesta no requiere de grandes insumos para ser aplicada, ya que dependerá en gran medida de encontrar la información de los componentes ambientales del área de estudio, de la visita a terreno y también de un adecuado análisis computacional, por lo que resulta ampliamente aplicable.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Alberta, E., (2003). Environmental Protection Guidelines for Transmission Lines.
- 2) Angel, E., (2004). Métodos cuantitativos para la toma de decisiones ambientales. Universidad Nacional de Colombia.
- 3) Angel, E., (2005). Metodología para la selección de rutas de proyectos lineales transfronterizos incorporando múltiples criterios y decisores en los análisis de restricciones y posibilidades ambientales. Redalyc.
- 4) Bagli, S., Geneletti, D. & Orsi, F., (2011). Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. Environmental Impact Assessment Review 31, 234–239.
- 5) Bosque, J., García, R., (2000). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. Publicado en Anales de Geografía de la Universidad complutense, nº 20, 49-67.
- 6) Cadena, L., (2004). Evaluación prospectiva de restricciones y posibilidades ambientales de la interconexión eléctrica centroamericana.
- 7) Conama, (2008). Análisis de los Impactos Ambientales asociados a proyectos de Líneas de Transmisión Eléctrica.
- 8) Feijoo, J., (1995). Trazado de carreteras de mínimo impacto ambiental, mediante la utilización de un sistema de información geográfica.

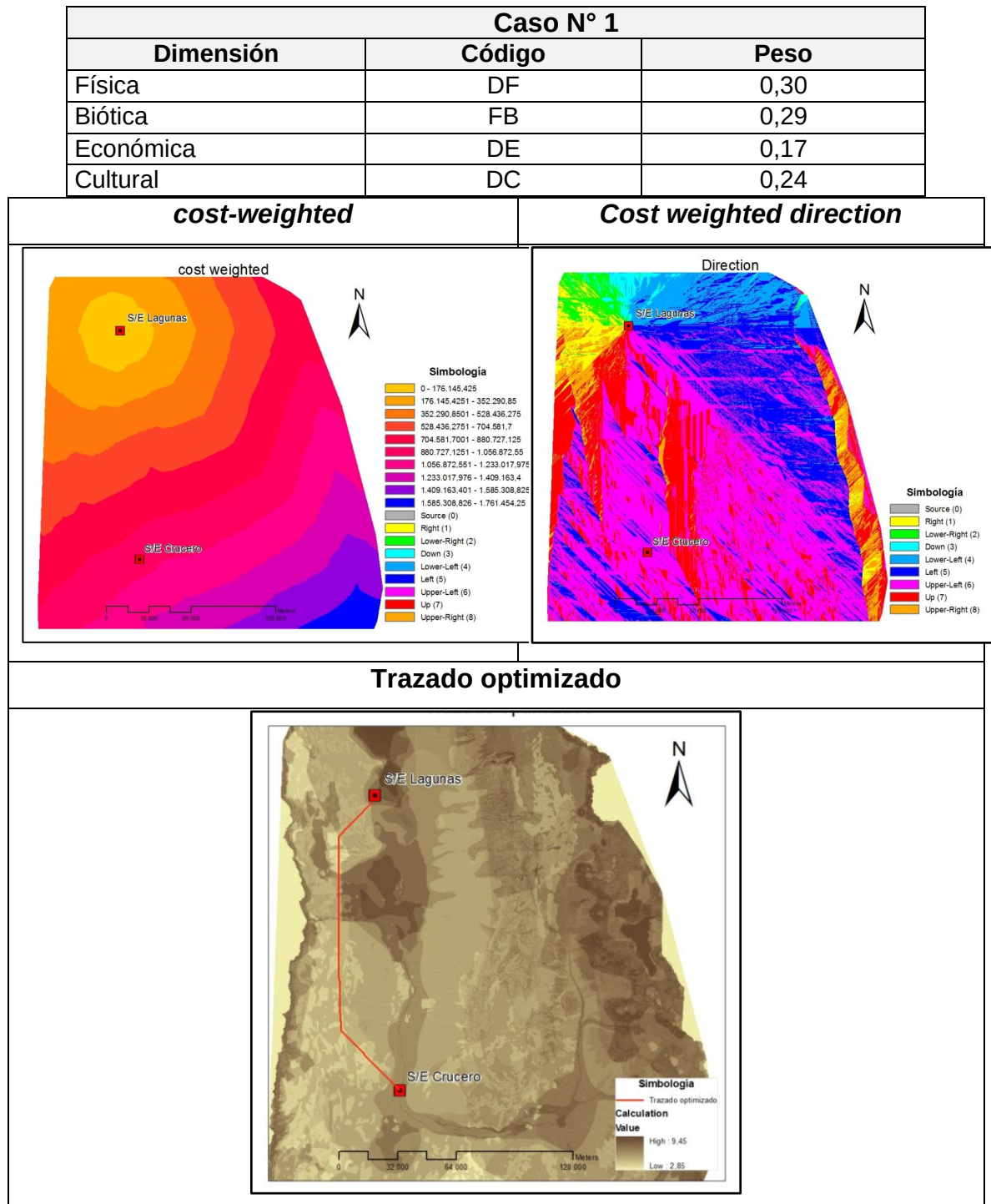
- 9) Igarza, R., (2008) Método Delphi, Apuntes para una implementación exitosa. Universidad de Concepción.
- 10) Kaousia, K., (2012). A GIS-based design of power line and post-construction optimization. Recent Researches in Environmental and Geological Sciences.
- 11) Luemongkol, F., (2009). Application of Satellite Imagery for Rerouting Electric Power Transmission Lines.
- 12) Monteiro, C., (2005). GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization. IEEE transactions on power delivery, vol. 20, no. 2.
- 13) Rezaee, N., et. Al. (2009). Role of GIS in Distribution Power Systems. World Academy of Science, Engineering and Technology 36.
- 14) Schmidt, A., (2009). Implementing a GIS Methodology for Siting High Voltage Electric Transmission Lines. Volume 11, Papers in Resource Analysis. 17 pp. Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press. Winona, MN. Retrieved (date) <http://www.gis.smumn.edu>
- 15) Singh, R., (2002). Electric transmission line routing using a decision landscape based methodology. Punjab Technicacal University.
- 16) Vinasco, L., (2005). Propuesta metodológica para la localización de proyectos Lineales con base en criterios de gestión ambiental, en Condiciones de imprecisión en la información, aplicando Análisis

multiobjetivo difuso a bases de datos espaciales. Universidad Nacional de Colombia.

- 17) Yildirim, V., (2010). Developing a Geospatial Model for Power Transmission Line Routing in Turkey. FIG Congress 2010, Sydney, Australia, 11-16.

ANEXO I: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

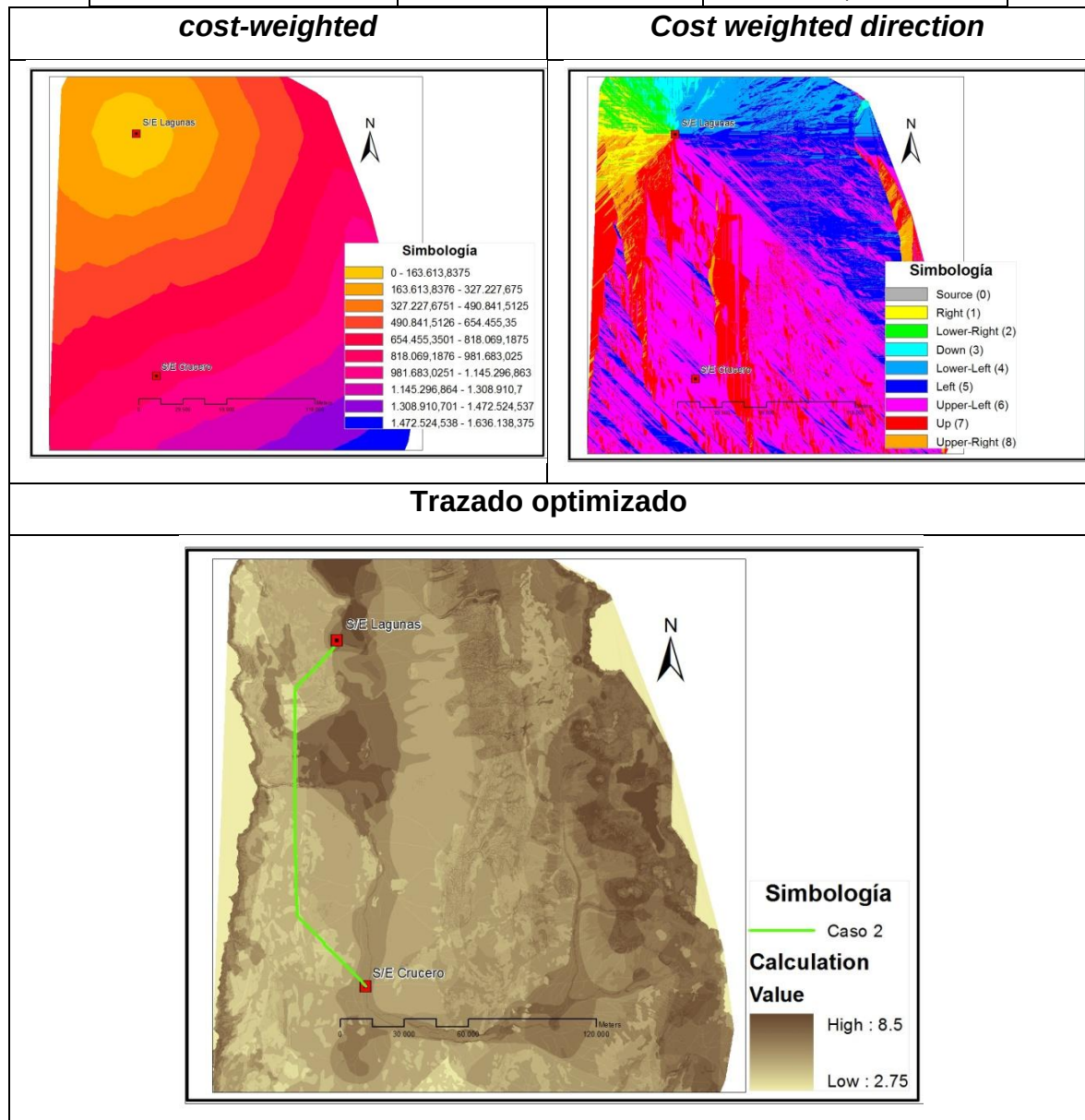
Tabla 27: Caso N°1, análisis de sensibilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28: Caso N°2, análisis de sensibilidad.

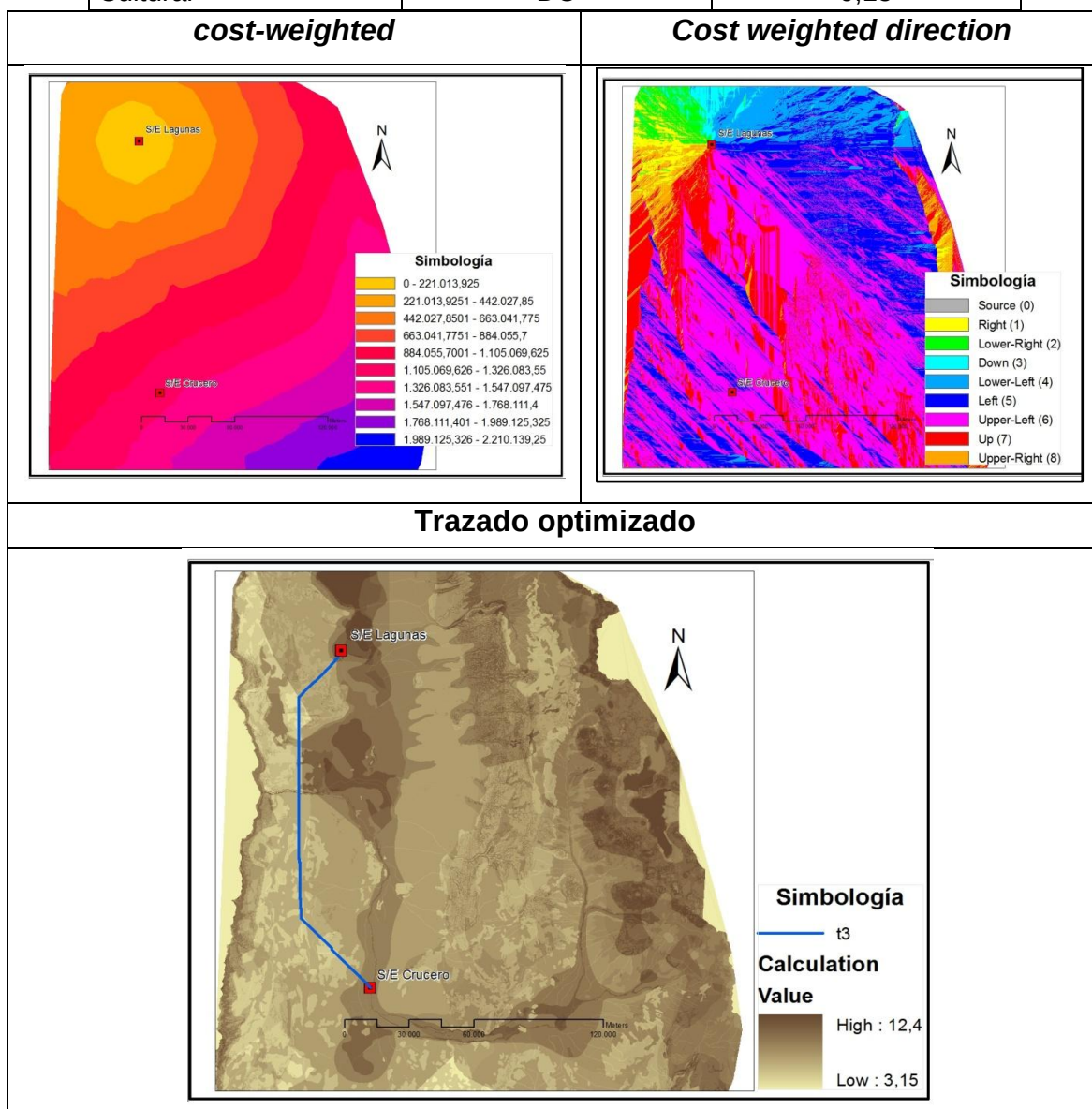
Caso N° 2		
Dimensión	Código	Peso
Física	DF	0,25
Biótica	FB	0,25
Económica	DE	0,25
Cultural	DC	0,25



Fuente: Elaboración propia.

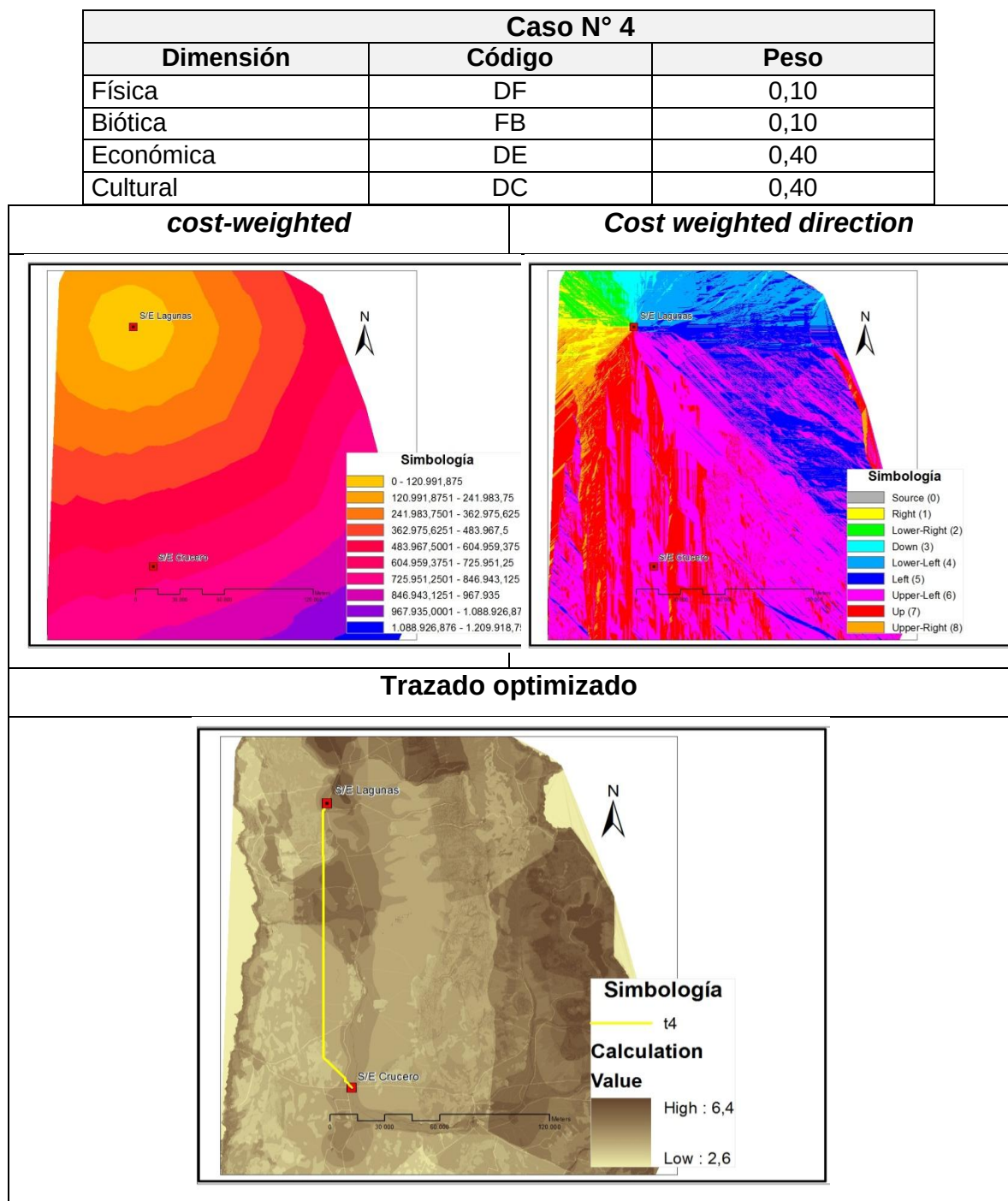
Tabla 29: Caso N°3, análisis de sensibilidad.

Caso N° 3		
Dimensión	Código	Peso
Física	DF	0,50
Biótica	FB	0,20
Económica	DE	0,15
Cultural	DC	0,15



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30: Caso N°4, análisis de sensibilidad.



Fuente: Elaboración propia.