



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

METODOLOGÍA DE DEFINICIÓN DE ENCLAVES ESTRATÉGICOS PARA EL
DESARROLLO DE MICRO-REDES EN IBEROAMÉRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

JOSÉ LUIS ORTIZ GALLARDO

PROFESORA GUÍA:
PATRICIO MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PABLO GONZÁLEZ INOSTROZA
GUILLERMO JIMÉNEZ ESTÉVEZ

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: JOSÉ ORTIZ GALLARDO
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: PATRICIO MENDOZA ARAYA

METODOLOGÍA DE DEFINICIÓN DE ENCLAVES ESTRATÉGICOS PARA EL DESARROLLO DE MICRO-REDES EN IBEROAMÉRICA

En la electrificación rural de zonas aisladas, las micro-redes aparecen como soluciones sostenibles, haciendo uso de energías renovables, y sostenibles a largo plazo, teniendo una mejor integración en las comunidades. En este estudio, se propone una metodología de definición de enclaves estratégicos para el desarrollo de micro-redes en Iberoamérica, con foco en soluciones rurales, de vocación productiva e islas sometidas a vulnerabilidad de abastecimiento energético.

La metodología consiste en una selección y priorización de comunidades que cumplan con las características de ser un enclave estratégico, en diferentes dimensiones, ya sea social, técnica y económica, de modo que se forman una serie de atributos/indicadores para determinar este tipo de comunidades. Además, dado que existe una diversidad de atributos en diferentes dimensiones, se hace de uso de la optimización multiobjetivo Óptimo de Pareto para la priorización de las comunidades.

La metodología se aplica en el territorio nacional chileno, del cual se selecciona un total de 4 comunas, dentro de las cuales se localizan un total de 27 comunidades aisladas, cumpliendo con la definición de enclave estratégico, y con una mayor concentración de estas en las macrozona norte y sur del país. En esta selección, se concluye que los filtros de selección de comunas, asociados a los indicadores 'Índice de Desarrollo Comunal (IDC)' y 'número de habitantes sin energía eléctrica', son determinantes, al contrario del indicador 'número de trabajadores por empresa' propuesto. En cuanto a los filtros de selección de localidades, asociados a los indicadores 'categoría', 'número de habitantes' y 'distancia a la red', los tres son considerados como fuertes o determinantes al aplicarlos.

En cuanto a la priorización, se concluye que los resultados varían dependiendo del objetivo o indicador de priorización escogido por el tomador de decisiones. En particular, cuando se escoge como indicador de priorización el IDC, tienen prioridad las localidades de las comunas Alto Biobío y Camarones. En cambio, al escoger el 'número de empresas' como indicador, tienen prioridad las localidades de las comunas Camarones, Putre y Freirina. Además, se deduce que, independiente del índice de priorización escogido, la optimización multiobjetivo Óptimo de Pareto permite considerar, en parte, a las localidades con mayores costos de inversión por habitante, es decir, localidades con menor potencial energético del país.

*Especialmente a mi hermosa familia y todas aquellas
personas que conocí durante este camino que
me han brindado un apoyo incondicional.*

Agradecimientos

En primer lugar, a mi familia, ya que son el pilar fundamental en mi vida y siempre he contado con su apoyo incondicional, incluso en los momentos más complejos. Es gracias a ellos que me he convertido en el profesional que soy.

A mis amigos que conocí durante este camino, quienes me ayudaron enormemente a llevar de mejor forma los años en la universidad.

A mi profesor guía, quien me apoyó siempre desde lo anímico hasta lo académico, incluso en el momento cuando tuve mi accidente.

A mi profesor co-guía, quien más que un profesor fue un amigo más, siempre con la buena disposición a brindarme ayuda en lo que necesitaba, tanto en la memoria como en el día a día.

Y, finalmente, a mi abuelita, quién hace unos años que no esta presente de forma tangible, pero si en mi corazón, cada día. Convertirme en un profesional era uno de tus sueños y lo he conseguido. Gracias por todos los lindos recuerdos que tengo de ti, gracias por enseñarme que la humildad es una virtud fundamental en esta vida y gracias por acompañarme siempre desde donde estés.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Estructura del trabajo	3
2. Marco teórico y estado del arte	4
2.1. Micro-redes	4
2.1.1. Definición	4
2.1.2. Desarrollo de proyectos	5
2.2. Métodos de toma de decisiones multicriterio	5
2.2.1. Proceso de Jerarquía Analítica	6
2.2.2. Optimización multi-objetivo: Frontera de Pareto	7
2.3. Herramientas digitales	7
2.3.1. Sistemas de Información Geográfica	7
2.3.2. Software de diseño de micro-redes: <i>HOMER Pro</i>	8
2.4. Estado del Arte	9
3. Metodología y desarrollo	14
3.1. Esquema metodológico	14
3.2. Desarrollo de propuesta metodológica	16

3.2.1.	Búsqueda y formación de capas de información	16
3.2.2.	Aplicación de filtros de selección: obtención de comunidades	20
3.2.3.	Definición de criterios para priorización de comunidades	21
3.2.4.	Aplicación de criterios de priorización	23
4.	Resultados y análisis	25
4.1.	Resultados	25
4.1.1.	Preselección de comunas	25
4.1.2.	Selección de comunidades	27
4.1.3.	Comunidades descartadas	30
4.1.4.	Priorización de comunidades seleccionadas	32
4.2.	Análisis de resultados	34
4.2.1.	Preselección de comunas	34
4.2.2.	Selección de comunidades	37
4.2.3.	Comunidades descartadas	41
4.2.4.	Priorización de localidades seleccionadas	42
5.	Conclusiones y trabajo futuro	45
5.1.	Conclusiones generales	45
5.2.	Trabajo futuro	46
	Bibliografía	47
	Anexos	51
A.	Base acumulativa de datos para comunas susceptibles a ser zona rezagada 2021	51
B.	Preselección de comunas	55
C.	Preselección de localidades	57

D. Selección de localidades	58
E. Localidades descartadas con potencial a ser enclave estratégico	60
F. Costo de inversión inicial por habitante de cada comunidad	62

Índice de Tablas

3.1. Costos de inversión referencial por tecnología de generación.	22
3.2. Valores técnicos de panel solar Jinko Solar [30] y aerogenerador Skystream [42].	23
4.1. Número de comunas preseleccionadas por región.	26
4.2. Comunas seleccionadas.	27
4.3. Distribución de localidades descartadas por comuna.	30
4.4. Número de habitantes promedio, máximos y mínimos de localidades descartadas por comuna.	31
4.5. Energía solar promedio, máxima y mínima de localidades descartadas por comuna.	31
4.6. Distancia a la red promedio, máxima y mínima de localidades descartadas por comuna.	31
4.7. Resultados de la priorización de comunidades según indicador IDC o N°Empresa.	33
4.8. Promedios de costos de inversión por habitante, potencial eólico y solar por comuna de localidades seleccionadas.	43
A.1. Comunas susceptibles a ser zona rezagada 2021.	52
B.1. Comunas preseleccionadas.	56
C.1. Localidades preseleccionadas.	57
D.1. Localidades seleccionadas.	59
E.1. Localidades descartadas con potencial a ser enclave estratégico.	61
F.1. Cálculo del costo de inversión inicial por habitante de cada comunidad. . . .	63

Índice de Ilustraciones

2.1. Escala de juicio o de Saaty [13].	6
2.2. Estructura jerárquica [13].	6
2.3. Frontera de Pareto de un problema de minimización [15].	7
2.4. Metodología multicriterio [23].	10
2.5. Metodología propuesta para la construcción del índice de priorización [24].	11
2.6. Metodología propuesta para la priorización de criterios y subcriterios [25].	12
2.7. Metodología para la planificación de micro-redes [26].	13
3.1. Metodología de memoria.	15
3.2. Ejemplo de priorización por Pareto Óptimo.	24
4.1. Preselección de comunas.	26
4.2. Leyenda para figuras 4.3, 4.4 y 4.5	28
4.3. Localidades seleccionadas de la Región de Arica y Parinacota.	29
4.4. Localidades seleccionadas de la Región de Atacama.	29
4.5. Localidades seleccionadas de la Región del Biobío.	30
4.6. Costos de inversión inicial por habitante de cada comunidad.	32
4.7. Distribución de comunas preseleccionadas por macrozona.	35
4.8. Cantidad de habitantes sin electricidad de comunas preseleccionadas por macrozona.	35
4.9. Distribución de comunas preseleccionadas por macrozona según IDC.	36
4.10. Distribución de comunas preseleccionadas por macrozona según número de habitantes sin energía.	36

4.11. Distribución de comunas preseleccionadas por macrozona según número de trabajadores por empresa.	37
4.12. Distribución de comunas seleccionadas por macrozona.	37
4.13. Cantidad de habitantes sin electricidad de comunas seleccionadas por macrozona.	38
4.14. Distribución de localidades por macrozona.	38
4.15. Distribución de localidades por macrozona según categoría.	39
4.16. Distribución de localidades por macrozona según cantidad de habitantes. . .	39
4.17. Distribución de localidades preseleccionadas por macrozona.	40
4.18. Distribución de localidades preseleccionadas por macrozona según distancia a red de distribución.	40
4.19. Distribución de localidades seleccionadas por macrozona.	41
4.20. Cantidad de habitantes de localidades seleccionadas por macrozona.	41
4.21. Indicadores IDC e Inv_0 por comunidad.	43
4.22. Indicadores N°Empresas e Inv_0 por comunidad.	44

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La energía eléctrica es fundamental para el desarrollo humano, ya que la mayor parte de las actividades desarrolladas por las personas, o actividades productivas, están asociadas a un consumo de este tipo de energía. En particular, la electrificación rural posee una importancia pocas veces valorada en su totalidad, tanto en el corto y largo plazo, donde algunos de los beneficios que entrega a sectores rurales son: integración de los sectores rurales al desarrollo económico nacional, frenar la migración rural-urbana, mejorar el nivel socio cultural de sus habitantes, entre otros [1].

Según estudios realizados por el Ministerio de Energía de Chile, el país presenta una cobertura de electrificación del 99,6 % a nivel nacional y un 96,5 % a nivel rural. Esto se traduce en que 24 mil viviendas no tienen acceso a energía eléctrica y unas 5 mil tienen acceso solo algunas horas del día [2]. Esto se debe a dos razones principales: la primera es por las características geográficas de Chile, lo cual condiciona la forma del sistema eléctrico nacional, es decir, un sistema eléctrico extenso y longitudinal, generando puntos aislados debido a los altos costos de infraestructura [3]. Y, en segundo lugar, por la falta de políticas públicas para incentivar la formación de proyectos sociales en materia energética, lo cual, en los últimos años, ha ido tomando fuerza tanto en el país como a nivel internacional.

Una de las soluciones que existen a esta problemática es la electrificación tradicional de zonas aisladas, las que se basan en el uso de unidades de generación que utilizan combustibles fósiles o también en la ampliación de la red de distribución más cercana [4]. Sin embargo, estas estrategias presentan elevados costos y muchas no consideran la realidad de las comunidades aisladas y otros problemas como la falta de personal calificado para la operación y mantenimiento de estos sistemas [5].

En la búsqueda de soluciones de sistemas eléctricos que sean más eficientes, flexibles y mejores en términos de sostenibilidad ambiental, aparecen las “micro-redes inteligentes”, las cuales

tienen una serie de ventajas como el aprovechamiento de recursos que existen en una determinada localidad, facilidad en la operación y mantenimiento del sistema, diseños ad-hoc que reduce los gastos extras por sobredimensionamiento, entre otros [6]. Esta serie de ventajas que presentan las micro-redes, ha generado que sean un foco de estudio hace más de una década. A pesar de lo anterior, no existen metodologías definidas para la identificación de enclaves estratégicos, ni de desarrollo y diseño de micro-redes inteligentes con foco en soluciones rurales de vocación productiva.

De esta forma nace el interés por encontrar una metodología que permita definir enclaves estratégicos para desarrollar micro-redes en comunidades aisladas energéticamente y con vocación productiva, tanto en Chile como en Iberoamérica, buscando aumentar la calidad de vida de las personas de zonas rurales aisladas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para la definición de enclaves estratégicos para el desarrollo de micro-redes en Iberoamérica, con foco en soluciones rurales, de vocación productiva e islas sometidas a vulnerabilidad de abastecimiento energético.

1.2.2. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Identificar localidades preliminares.
- Levantar información de localidades preliminares en diferentes dimensiones.
- Definir criterios para la selección de enclaves estratégicos.
- Desarrollar metodología para la selección y priorización de enclaves estratégicos.
- Identificar enclaves seleccionados mediante herramientas GIS.

1.3. Estructura del trabajo

El presente trabajo contiene 5 capítulos que se presentan brevemente a continuación:

- El capítulo 1 es la introducción, donde se presenta la motivación y objetivos del trabajo realizado.
- El capítulo 2 contiene el marco teórico y estado del arte, el cual permite al lector contextualizarse y brindar la información necesaria para comprender el trabajo resuelto.
- El capítulo 3 presenta la metodología propuesta y su desarrollo, donde se describe, paso a paso, el procedimiento realizado.
- El capítulo 4 contiene los resultados obtenidos, donde se analizan los diferentes escenarios posibles.
- Finalmente, en el capítulo 5, se exponen las principales conclusiones del trabajo realizado y el trabajo a futuro de este.

Capítulo 2

Marco teórico y estado del arte

2.1. Micro-redes

2.1.1. Definición

Existen varias definiciones para el concepto de micro-redes, dependiendo de la mirada del autor, ya sea de alguna compañía o de estándares. Sin embargo, estas definiciones presentan varias cosas en común. Según *CIGRE MicroGrid Working Group*, las micro-redes son “sistemas de distribución de electricidad que contienen cargas y recursos energéticos distribuidos (como generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento o cargas controlables) que se pueden operar de manera controlada y coordinada, ya sea mientras están conectados a la red eléctrica principal o en una isla” [7]. Algo semejante se nombra en [8], donde se define como un “subconjunto auto sostenible y autónomo de un sistema de potencia que puede operar independientemente o conectado a la red”. Y, como último ejemplo, *General Electric* las define como un “sistema de energía integrado con recursos energéticos distribuidos (DER) locales, como cargas locales, activos de generación y posiblemente dispositivos de almacenamiento de energía, como baterías o pilas de combustible. Un sistema de micro-red normalmente es capaz de operar en modo aislado (fuera de la red) o conectado a la red [9], mencionando que las micro-redes aisladas se encuentran especialmente en comunidades remotas y es su modo de operación más común.

En resumen, de acuerdo a las distintas referencias mencionadas, una micro-red tiene las siguientes características:

- Coexiste generación y consumo en el mismo sistema eléctrico.
- Operación aislada o conectada a la red.
- Mejora la calidad y confiabilidad de la gestión de la energía.
- Diseño ad-hoc a las necesidades energéticas locales.

En particular, las micro-redes aisladas para comunidades remotas, tienen características específicas, como por ejemplo: integran y coordinan diferentes fuentes de energía (en su mayoría renovable) con estrategias apropiadas de carga-frecuencia, dado que no tienen una referencia (red externa), presentan una participación activa de la comunidad local y debe atender a las diferentes condiciones y características locales [10]. Por lo tanto, es de suma importancia contar con una correcta planificación de micro-redes, para así lograr una operación eficiente y un desarrollo sostenible a largo plazo.

2.1.2. Desarrollo de proyectos

Hay varios estudios que proponen formas para llevar a cabo el desarrollo de proyectos de micro-redes aisladas. Como se mencionó anteriormente, en [11] se presenta una metodología de 5 pasos, la cual tiene como finalidad asegurar que las soluciones diseñadas sean adecuadas a la realidad local de cada comunidad, así como también lograr la sostenibilidad del proyecto. También en [12] se hace una mención, muy semejante al estudio anterior, el cual divide el proceso en 4 etapas:

- **Planificación:** en general, se encarga de cuantificar la viabilidad técnica, económica y social para realizar una micro-red aislada en una comunidad.
- **Diseño:** permite dimensionar la solución tecnológica y la participación de la comunidad en el proyecto, incluyendo el modelo de gestión, con el fin de cuantificar los recursos necesarios para el desarrollo de la micro-red.
- **Implementación:** es la materialización del diseño de la micro-red. Además, se realiza el proceso de puesta en marcha del proyecto y se verifican los cambios producidos por la electrificación en el estilo de vida de la población.
- **Operación y Mantenimiento:** permite establecer el esquema de O&M, con el propósito de asegurar un adecuado funcionamiento de la micro-red.

En particular, esta memoria se encontrará inserto en la etapa de planificación, especialmente, en encontrar localidades que tengan el potencial suficiente para desarrollar proyectos de micro-red, tomando en cuenta no solo dimensiones técnicas y económicas, sino que también sociales y ambientales de cada comunidad.

2.2. Métodos de toma de decisiones multicriterio

La selección de comunidades para el desarrollo de micro-redes corresponde a un problema donde se deben analizar un conjunto de variables o dimensiones para alcanzar una solución óptima. Es por ello que esta problemática corresponde a un ejercicio de optimización multicriterio. Existen varios métodos de toma de decisiones multicriterio, sin embargo, según la revisión bibliográfica realizada, los métodos más comunes para este tipo de problemas son el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP por sus siglas en inglés) y la Frontera de Pareto, los cuales serán explicados a continuación.

2.2.1. Proceso de Jerarquía Analítica

Es el método de uso más frecuente en el campo de la planificación energética, ya que cuenta con dos ventajas principales: la cuantificación y ponderación de criterios sobre un objetivo determinado y presenta un proceso matemático fácil de comprender.

El Proceso de Jerarquía Analítica es una metodología de análisis multicriterio desarrollada por Thomas L. Saaty a finales de los años 70. Este método involucra todos los aspectos de un proceso de toma de decisiones: modela el problema a través de una estructura jerárquica, utiliza una escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, de esta forma combina la multiplicidad de escalas correspondientes a los diferentes criterios, sintetiza los juicios emitidos y entrega un ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos.

Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia.	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro.	Un elemento domina fuertemente.
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	
Incrementos 0,1	Valores intermedios entre incrementos (utilice esta escala si cree que su valoración necesita un alto grado de precisión).	
Inversos $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar.	

Figura 2.1: Escala de juicio o de Saaty [13].

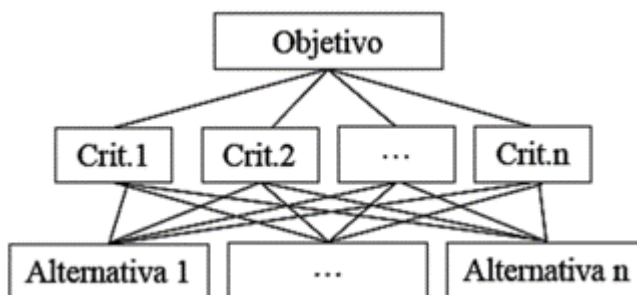


Figura 2.2: Estructura jerárquica [13].

En la figura 2.2 se muestra un ejemplo del modelo jerárquico, en donde se incorporan los diferentes criterios y alternativas para el proceso de decisión y además se ingresan los juicios (ver figura 2.1) correspondientes a las comparaciones pares entre los diferentes elementos del modelo. Finalmente, el problema se resuelve con el cálculo de valores y vectores propios que representarían las prioridades de las alternativas [13].

2.2.2. Optimización multi-objetivo: Frontera de Pareto

La optimización multi-objetivo es una herramienta útil cuando se busca optimizar varios objetivos simultáneamente. Esta proporciona un conjunto de soluciones eficaces, constituyendo la denominada Frontera de Pareto. Las soluciones que forman parte de esta frontera no pueden mejorarse sin que empeore cualquier otra solución de dicho conjunto.

El concepto Óptimo de Pareto nace en mundo de la economía (por Vilfredo Damasco Pareto a finales de los años 40), bajo la teoría del bienestar, donde se definía como la situación en la que no se puede mejorar a una persona, sin desmejorar a otra [14]. Sin embargo, este concepto es aplicable a otras áreas, tanto en ciencias sociales como en la ingeniería.

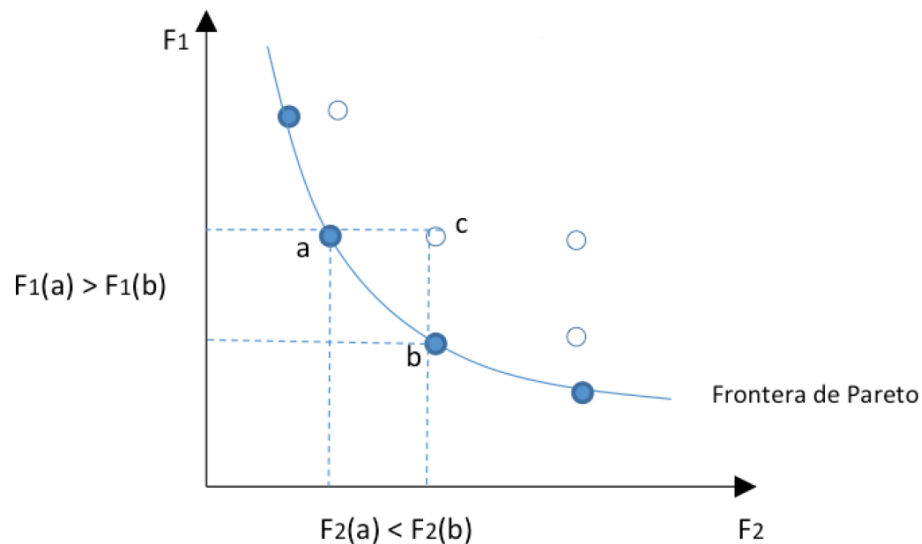


Figura 2.3: Frontera de Pareto de un problema de minimización [15].

En la figura 2.3 se observa una Frontera de Pareto, donde las alternativas 'a' y 'b' son pareto óptimo del conjunto de soluciones. Esto porque siempre que se intenta mejorar un objetivo (F_1 o F_2), se empeora otro.

2.3. Herramientas digitales

2.3.1. Sistemas de Información Geográfica

Un sistema de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés) es un sistema informático que permite capturar, almacenar, analizar y mostrar datos relacionados con la posición geográfica. Además, permite la creación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, etc. [16].

Se pueden comparar y contrastar muchas capas de información utilizando GIS. El sistema puede incluir datos sobre personas, población, ingresos o nivel educativo. Como también incluir información sobre el terreno, la ubicación de arroyos, diferentes tipos de vegetación y diferentes tipos de suelo, entre otros tipos de información.

Una forma de entender un GIS es visualizarlo como una serie de subsistemas, cada uno encargado de funciones particulares. Hay tres subsistemas fundamentales [17]:

- Subsistema de datos: se encarga de las operaciones de entrada y salida de los datos y su gestión dentro del GIS. Permite que el resto de subsistemas tengan acceso a los datos y puedan realizar sus funciones en base a ellos.
- Subsistema de visualización y creación cartográfica: se encarga de generar representaciones (mapas, leyendas, etc.) a partir de los datos. También permite la edición de los datos.
- Subsistema de análisis: contiene métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos.

Algunos ejemplos de este tipo de herramientas son Google Earth, QGIS, ArcGIS, entre otros.

2.3.2. Software de diseño de micro-redes: *HOMER Pro*

HOMER Pro es el software por excelencia para optimizar el diseño de micro-redes en todos los sectores, ya sea para comunidades aisladas o para campus conectados a la red [18]. Este simula el funcionamiento de una micro-red con todos sus componentes, para un gestor de energía seleccionado, a lo largo de la vida útil del proyecto. El software también cuenta con un optimizador económico que busca la mejor combinación y dimensiones de los distintos componentes que conforman la micro-red, resultando el dimensionamiento óptimo en base al valor actual de los costos del proyecto (VAC, por sus siglas en inglés) de toda su vida útil. Esta herramienta permite, además, realizar un análisis económico y energético de las cantidades de energía generada y consumida por cada componente del sistema a fin de facilitar el diseño de la micro-red estudiada.

Los principales parámetros económicos a ingresar son la tasa de inflación y la tasa de descuento nominal, que se utilizan para calcular el costo total del proyecto referido al presente (VAC). Se deben ingresar también costos de cada componente de la micro-red, costos de recambio, gastos de operación y mantenimiento, precio de combustible, etc. Para las restricciones operativas, se destacan los siguientes parámetros: porcentaje mínimo de renovable, máxima capacidad anual de corte (porcentaje), cantidad anual de energía comprada y vendida a la red; las penalidades por emisiones de gases de efecto invernadero y por exceso de consumo de energía de la red [19].

2.4. Estado del Arte

La electrificación rural de zonas aisladas lleva más de dos décadas en análisis en Chile, donde destaca el Programa de Electrificación Rural (PER), creado en el año 1994, el cual ha tenido buenos resultados a la fecha, pasando de un 80% aprox. a más de un 96% de cobertura de electrificación, empleando tanto sistemas conectados a la red (*On-Grid*) como sistemas aislados (*Off-Grid*). La mayoría de los sistemas aislados ejecutados han sido micro-redes en base a generadores diesel y es por ello que al día de hoy, el programa PER tiene como foco incentivar proyectos pilotos, usando tecnologías ERNC [20], las cuales aprovechan de mejor forma el potencial energético de una zona y siguen la línea de la sostenibilidad ambiental.

El desarrollar micro-redes inteligentes en zonas aisladas rurales presenta grandes desafíos, dado que se necesita de una gran planificación que debe tomar en cuenta no solamente dimensiones técnicas y económicas, sino que también sociales, culturales, políticas, demográficas, etc. [21], con el fin de que la comunidad logre sentirse en armonía con el proyecto, que mejore su calidad de vida y que tengan un mayor desarrollo productivo.

Existen varios estudios que presentan un foco en el desarrollo de proyectos de energías renovables para comunidades aisladas, de las que se rescatan muchos puntos interesantes y de los cuales se hablarán a continuación.

En [22] se propone una metodología de cinco pasos para el desarrollo de un proyecto de micro-redes, donde su objetivo es asegurar que las soluciones diseñadas sean adecuadas a la realidad local de cada comunidad, así como para lograr la sostenibilidad del proyecto. Los 5 pasos son: Prefactibilidad, Diseño, Ingeniería de Detalles, Puesta en Servicio y Operación y Mantenimiento (O&M), donde en cada uno de ellos existen subpasos de socialización del proyecto, muy importantes para la integración de la comunidad.

Además, se propone un plan de electrificación basado en micro-redes, el cual contiene las siguientes 3 etapas:

1. Elaboración de catastro
2. Plan de desarrollo de micro-redes
3. Gestión y seguimiento de micro-redes

De las etapas mencionadas, las que interesan analizar son las dos primeras. La primera etapa comienza con la recopilación de información para identificar las comunidades que carecen de servicio eléctrico continuo, incluidas las comunidades con grupos de electrógenos de combustibles fósiles que tienen un programa de suministro limitado. Luego, se aplican filtros de acuerdo a las características necesarias para el desarrollo de una micro-red, como por ejemplo: número de habitantes, número de casas, aldeas sin proyectos de electrificación vigentes, entre otras, y, finalmente, se valida la información obtenida con instituciones locales o mediante la organización de visitas a terreno, donde en particular se utiliza el método de Valoración Rural

Rápida para recopilar los antecedentes más relevantes para el diseño de la solución energética.

Una vez obtenido el conjunto de comunidades seleccionadas, se pasa a la segunda etapa, en la cual se priorizan las localidades de acuerdo a criterios sociales, económicos y productivos, donde en las dos primeros hacen de uso del Índice de Desarrollo Humano (IDH) y del Valor Actual de los Costos, respectivamente. Una vez aplicados los criterios, se propone seguir un esquema de ejecución de proyectos para las comunidades que se encuentran en el Frente de Pareto. No obstante, en el caso de estudio, solamente se aplican los criterios de IDH y VAC, dejando de lado el indicador productivo, dado que no se pudo recopilar la información suficiente en todas las comunidades para aplicar este criterio. Esto es una de las razones por la cual el estudio no da solución al objetivo general de esta memoria.

En [23] se parte de la premisa de que cuando la población es parte activa de los proyectos energéticos, estos mejoran su sostenibilidad en el tiempo. Es por ello que la idea principal del estudio es entregar una metodología multicriterio para priorizar proyectos energéticos considerando la participación comunitaria. En la figura 2.4 se observa la metodología propuesta, la cual consta de dos partes: la primera, consiste en priorizar el orden de desarrollo del proyecto y, la segunda, considera la elaboración de una guía de desarrollo que facilite la interacción entre la comunidad y la entidad promotora de proyectos socioenergéticos.

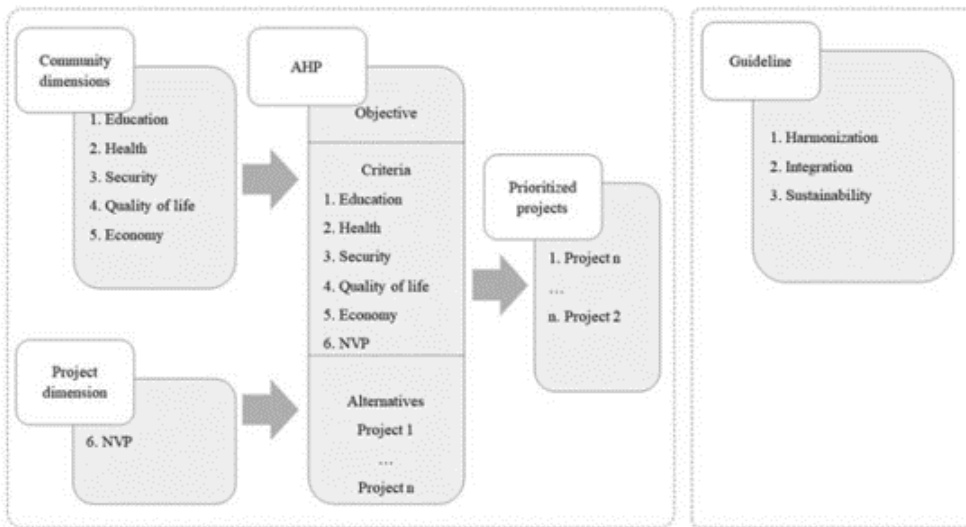


Figura 2.4: Metodología multicriterio [23].

En la priorización de proyectos, se empieza con una evaluación de la comunidad y una evaluación del proyecto. En cuanto a la comunidad, se toman en cuenta las dimensiones de salud, calidad de vida, educación, seguridad y economía. En cambio, para la evaluación del proyecto se utiliza el Valor Presente Neto (VPN) de este. Luego, se pasa a la fase siguiente que realiza la evaluación en conjunto, donde la herramienta de toma de decisiones multicriterio usado es el Proceso de Jerarquía Analítica, dado que es el más apropiado y de uso frecuente en el campo de la planificación energética y, además, tiene la ventaja de cuantizar y ponderar criterios sobre un objetivo determinado. Una vez aplicado el Proceso de Jerarquía Analítica, se obtiene la priorización de proyectos de acuerdo a los criterios mencionados anteriormente.

En [24] se propone una metodología para la selección ordenada de comunidades aisladas al implementar proyectos de electrificación rural basados en energías renovables, sin la necesidad de recopilar información en terreno, sino que directamente de fuentes públicas disponibles. La metodología se compone de 2 partes fundamentales: la primera, consiste en una metodología para evaluar el potencial energético de los recursos naturales disponibles en una región y, la segunda, propone la formulación de un índice de prioridades, con el cual se clasificaría a las comunidades para desarrollar proyectos.

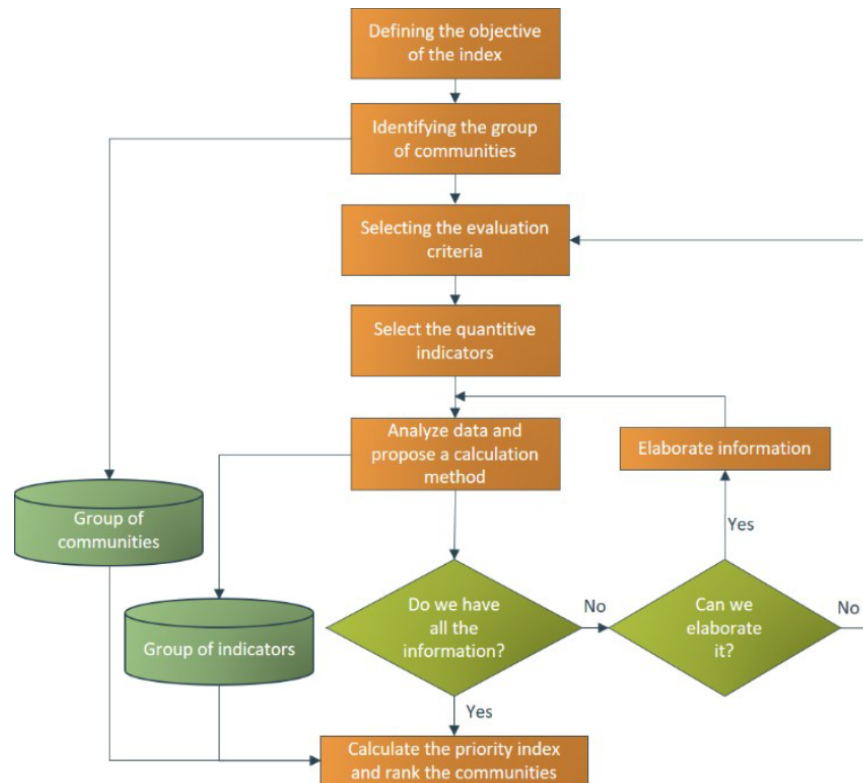


Figura 2.5: Metodología propuesta para la construcción del índice de priorización [24].

En la figura 2.5 se observa la metodología propuesta para la formación del índice de prioridades. Esta parte con la definición del objetivo del índice, el cual determinaría la información a recopilar. Luego, se establece el grupo de comunidades a considerar, a los cuales se le deben aplicar filtros o criterios de evaluación adecuados. Estos pueden presentar características técnicas, económicas, sociales, ambientales y de riesgo. En particular, el trabajo considera solamente características sociales y técnicas. Luego, esta información es representada en un dato cuantitativo (indicador), como por ejemplo: potencial energético, número de hogares, nivel económico de la comunidad, entre otros, los cuales se obtienen de estudios públicos. Luego, estos indicadores se analizan con métodos de correlación, normalización y variabilidad, donde tanto la correlación y variabilidad funcionan como filtros para descartar indicadores. Luego, con los indicadores ya seleccionados, se establecen las ponderaciones de estos y se construyen los índices de prioridad, usando una suma ponderada de los indicadores. Finalmente, se resuelve el problema utilizando la Frontera Pareto.

En [25] se desarrolla una metodología para la priorización de criterios y subcriterios necesarios

para la planificación de micro-redes en áreas remotas, cuyo diagrama de flujo se observa en la figura 2.6.

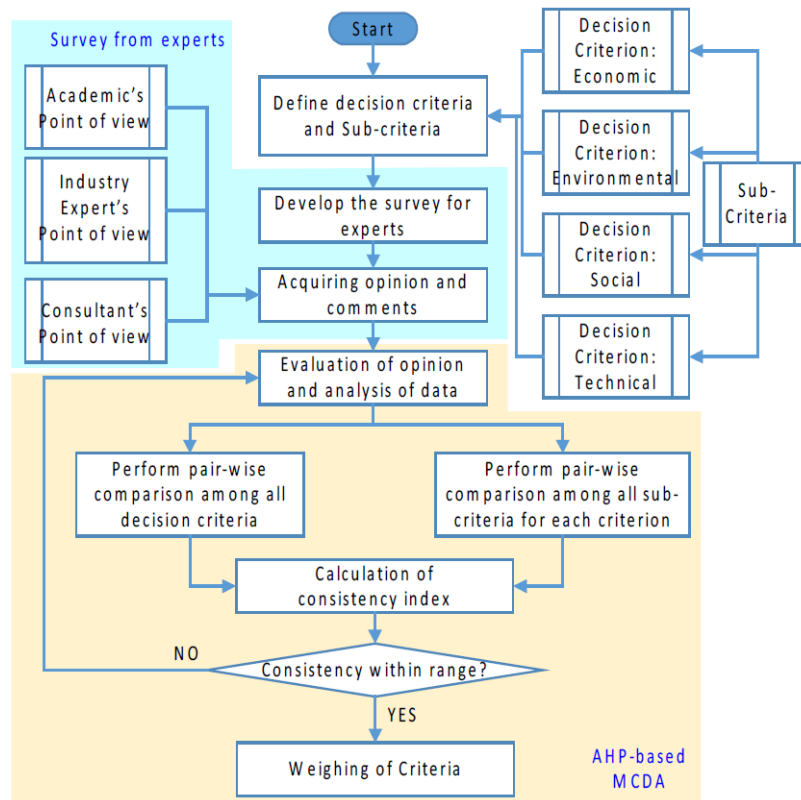


Figura 2.6: Metodología propuesta para la priorización de criterios y subcriterios [25].

La metodología parte con la definición de los criterios y subcriterios para la electrificación óptima de una micro-red en una comunidad remota. La mayoría de los investigadores del área consideran criterios económicos, ambientales, técnicos y sociales y, por lo tanto, el estudio considera solamente estos cuatro. Además, cada criterio se divide en varios subcriterio, con el fin de que la toma de decisiones sea más completa. Luego, el segundo paso es obtener la ponderación de cada criterio y subcriterio. Para ello, se desarrolla una encuesta para recopilar la importancia relativa y puntuación, la cual se distribuyó a expertos del mundo, es decir, a académicos, expertos de la industria y consultores. Finalmente, el último paso es evaluar la priorización comparativa de cada grupo de expertos y determinar las ponderaciones de todos los criterios y subcriterios. Para ello, se aplican tres principios: descomposición, juicios comparativos y síntesis de prioridades, donde, en los dos últimos, se encuentra inserto el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP).

En [26] se propone una metodología genérica para planificar y diseñar micro-redes para la electrificación rural de áreas remotas en función de las características que presente cada comunidad.

Como se observa en la figura 2.7, la metodología de planificación consta de 4 etapas. En primer lugar, se define el universo de ubicaciones eléctricamente aisladas, donde se realiza un análisis detallado sobre la localización de la comunidad y los planes de electrificación para los próximos años. Luego, se realiza una comparativa técnico-económica de la inversión inicial



Figura 2.7: Metodología para la planificación de micro-redes [26].

entre una electrificación por extensión de red o micro-red. Ya en la segunda etapa, se recoge la información necesaria del universo de micro-redes aisladas factibles, como por ejemplo: la situación actual, recursos energéticos, población, desarrollo y potencial de crecimiento económico y consumo eléctrico. Luego, en la etapa 3, se analiza la información obtenida con la ayuda de 5 criterios de selección: situación actual de electrificación, viabilidad económica, criterio humano, topografía y consumo. Y, finalmente, se priorizan las comunidades en las que se desarrollarán micro-redes considerando los 5 criterios mencionados.

Capítulo 3

Metodología y desarrollo

3.1. Esquema metodológico

Antes de presentar la metodología propuesta, se define como “enclave estratégico” a toda comunidad que presente las siguientes características:

- Sufrir aislamiento geográfico, baja presencia y cobertura de servicios básicos y públicos.
- No tener acceso a energía eléctrica o tener acceso de forma parcial a ella.
- Presentar bajo desarrollo económico, pero si un potencial de este.

En la figura 3.1, se presenta el esquema que especifica las distintas etapas que componen la metodología del trabajo y siguen la línea de los objetivos establecidos.

En primer lugar, se realiza una búsqueda de fuentes de información geográficas que permitan encontrar las características de ser un enclave estratégico, como también para caracterizar a las comunidades en diferentes dimensiones, ya sea en términos sociales, ambientales, económicos y técnicos, entre otros. Por lo tanto, se necesita recopilar información censal, regional (o comunal) y energética.

Luego, se elaboran las capas de información dependiendo del tipo de dimensión y se analizan con algún software de Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Una vez diferenciadas las capas de información geográficas, estas se deben cruzar para obtener una cartografía de comunidades preseleccionadas. Posteriormente, se definen los filtros o criterios, con sus indicadores respectivos, para estimar que comunidad presenta condiciones más favorables para la elaboración de un proyecto de micro-redes. Los criterios se pueden agrupar por dimensión, por ejemplo: en la dimensión técnica, se pueden definir los criterios de potencial energético, característica de la demanda de energía, número de viviendas por comunidad, etc. En la dimensión económica, algunos criterios pueden ser del nivel de desarrollo económico de la zona, el potencial económico de esta, el impacto en la productividad, el costo de la aplicación del proyecto, etc. En la dimensión ambiental, los criterios pueden

ser la presencia de terrenos en conflicto, escasez de recursos de la zona, presencia de áreas protegidas, etc., y, en la dimensión social, algunos criterios podrían ser el rango etario, etnias, el nivel de desarrollo humano, el nivel de migración, entre otros. Una vez definido los criterios e indicadores con sus respectivos rangos de valores, estos deben ser aplicados siguiendo las características que definen ser un enclave estratégico, logrando de esta forma la selección de comunidades.

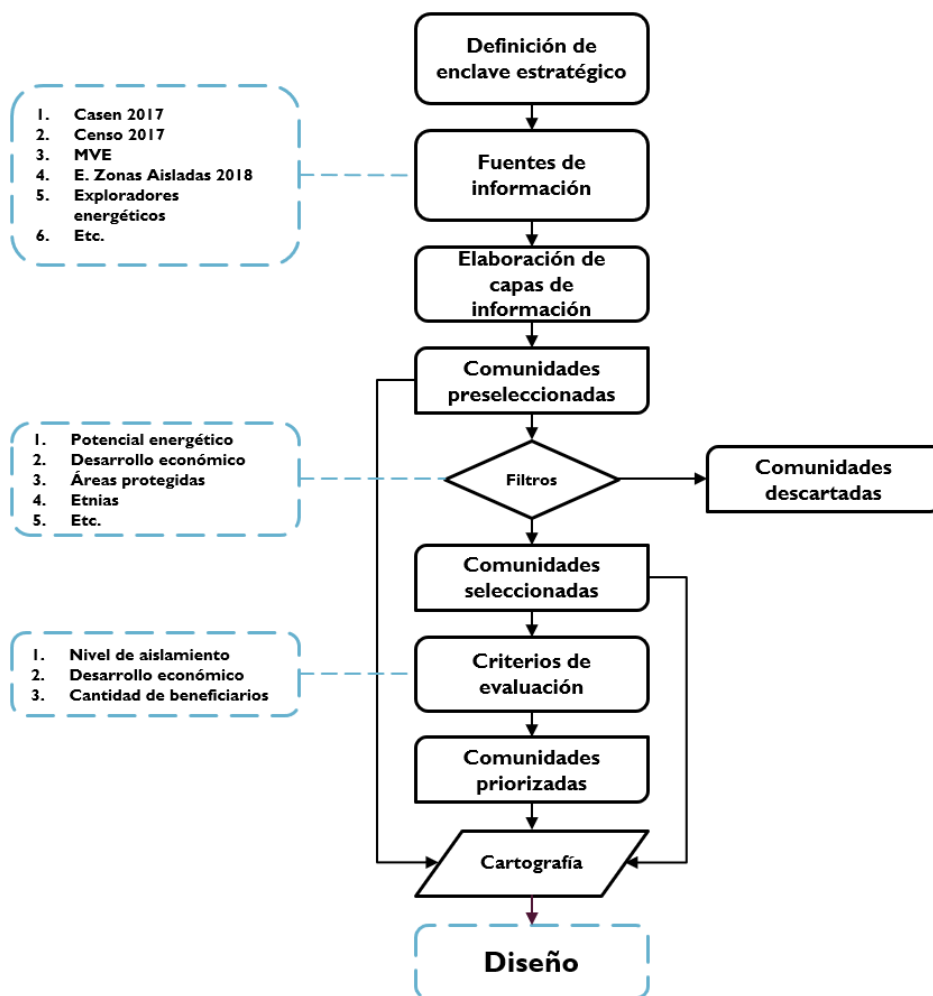


Figura 3.1: Metodología de memoria.

Luego, para la priorización de comunidades, se implementa el Proceso de Jerarquía Analítica, tomando como criterios de evaluación algunos de los criterios definidos para la etapa de selección de comunidades u otros nuevos. Sin embargo, aquí podría haber problemas de cálculo, lo que respecta a la dimensión de las matrices. Por lo tanto, una segunda opción sería resolver el problema utilizando Pareto Óptimo, usando algunos de los criterios mencionados anteriormente.

Finalmente, se obtiene la cartografía definitiva de las comunidades seleccionadas y priorizadas, con la información necesaria adjunta para el desarrollo de un proyecto de micro-redes.

3.2. Desarrollo de propuesta metodológica

La metodología propuesta será aplicada en el territorio nacional chileno, debido al mayor conocimiento que se tiene sobre el país y por la accesibilidad a información pública georreferenciada existente.

3.2.1. Búsqueda y formación de capas de información

Como se mencionó en la metodología, se debe buscar información que define ser un enclave estratégico, es decir, localidades que sufran aislamiento geográfico, que no tengan acceso a energía eléctrica y que tengan vocación productiva. Además, según [25], las dimensiones más importantes a la hora de desarrollar proyectos de micro-redes en localidades remotas, son: dimensión técnica, económica, medioambiental y social. Para cada una de estas dimensiones se formarán capas de información, los cuales serán fundamentales para el siguiente paso; la selección de comunidades. Todas las capas serán mapeadas en el *software* QGIS.

Dimensión técnica

Dimensión que busca presentar información suficiente para la toma de decisiones desde el punto de vista energético. En esta dimensión se consideran las siguientes capas de información:

- Potencial energético: representa los recursos energéticos solares y eólicos existentes en cada punto del territorio nacional. Las capas de información fueron obtenidas de los exploradores solares y eólicos del Ministerio de Energía de Chile [27] [28], de los cuales se extraen los datos de radiación global horizontal (ghi) promedio anual y la velocidad del viento promedio anual, a 10 metros de altura, la cual es la altura típica para aerogeneradores usados en micro-redes [29].

Los datos extraídos tienen una resolución por kilómetro cuadrado y se encuentran en formato *'tif'*, el cual puede ser directamente ejecutado en QGIS.

Para formar la capa de potencial energético, se deben pasar estas unidades de medida a alguna unidad de energía. Por lo tanto, para obtener la energía proveniente del sol, se usa la siguiente fórmula:

$$E_{solar} = ghi \cdot \eta \quad (3.1)$$

Donde 'ghi' es la radiación global horizontal en [kWh/m²/día] y ' η ' es la eficiencia del panel solar. Para este trabajo, la eficiencia del panel solar usada será de 20,38 %, el cual es la eficiencia de un panel solar JINKO de 410 [W] [30].

En cuanto a la energía proveniente del viento, se debe considerar la potencia disponible del viento, junto al efecto parque¹ y la eficiencia de los aerogeneradores, lo que resulta en la siguiente ecuación:

¹El efecto parque corresponde a la ralentización del viento por un aerogenerador tras de sí al obtener energía de él para convertirla en electricidad.

$$E_{eolica} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \eta \cdot 24[h]}{1000 \cdot La \cdot Lb} \quad (3.2)$$

Donde 'R' es el radio del rotor del aerogenerador, ' ρ ' es la densidad del aire, ' v ' es la velocidad del viento, ' η ' es la eficiencia del aerogenerador, 'La' son los diámetros de rotor en dirección de viento dominante y 'Lb' son los diámetros de rotor en dirección perpendicular a los vientos dominantes [31]. La ecuación se puede dejar independiente del radio del rotor, dado que existen unidades de este tanto en el numerador como el denominador. Por lo tanto la ecuación resultante sería la siguiente:

$$E_{eolica} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (\frac{1}{2})^2 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \eta \cdot 24[h]}{1000 \cdot a \cdot b} \quad (3.3)$$

Donde 'a' y 'b' serían las veces(múltiplos) de diámetros de rotor en la dirección de viento correspondiente. Para este trabajo, la eficiencia del aerogenerador usada sería de un 40 % [32] y los valores del efecto parque 'a' y 'b' serían los valores promedios de 4 y 7 [31], respectivamente.

Con estas ecuaciones, se obtendrían las energías eólica y solar en unidades de [kWh/m²/día], con lo cual se consigue una unidad de medida común.

- Número de viviendas/personas: representa la población existente por áreas específica. Esta capa de información esta formada con datos recopilados por el CENSO 2017, del Instituto Nacional de Estadísticas de Chile [33], los cuales están separados por región, provincia y comuna. Además, existe una segunda categorización espacial, las llamadas 'entidades'², para sectores rurales, y por 'manzanas', para sectores urbanos. En este trabajo solo se usarán el número de personas a nivel comunal y de entidad.
- Demanda energética: esta capa representa la energía eléctrica consumida esperada por la localidad seleccionada. Esta capa esta formada según datos extraídos del estudio 'Informe Final Caracterización Residencial 2018'[34]. Este informe entrega el consumo residencial por zona térmica³, en [kWh/vivienda/año], a lo largo del territorio nacional.
- Suministro energético: representa el acceso a la energía eléctrica que tiene cierta comuna o localidad. Esta capa de información esta formada con datos del Mapa de Vulnerabilidad Energética (MVE) y del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN).

Del MVE se extrajo información del número de viviendas sin acceso a energía eléctrica (o suministro parcial) por comuna y, además, cuenta con información de sistemas eléctricos aislados o de autogeneración, con suministro parcial o permanente [2]. Sin embargo, la base de datos del número de viviendas sin acceso a energía eléctrica es imprecisa para comunas con un número menor a 50 viviendas sin cobertura eléctrica. Por lo tanto, se trabaja con el porcentaje de cobertura eléctrica, dato que efectivamente se encuentra en la base de datos, junto al número de habitantes por comuna dictado

²Entidad o entidad de población es un asentamiento humano dentro de una localidad, con nombre propio reconocido por sus habitantes. Estas se diferencian entre sí por las características de su poblamiento (categorías), su denominación y las funciones que desarrollan en el ámbito territorial.

³Las zonas térmicas corresponden a zonas geográficas del territorio chileno que fueron definidas en la Reglamentación Térmica de MINVU año 2000 y que son usadas en el Informe Final de Caracterización Residencial 2018.

por el CENSO 2017. Con estos dos datos, se calcula el número de habitantes sin energía eléctrica, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Habitantes_{sin\ energia} = Habitantes \cdot (1 - Cobertura/100) \quad (3.4)$$

En cuanto del CEN, se extrajo información de la ubicación de los alimentadores de distribución desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región del Biobío.

Dimensión económica

En esta dimensión se presenta información necesaria para la selección de comunidades y factibilidad de desarrollo de un proyecto desde una mirada socioeconómica. En esta dimensión se encuentran las siguientes capas de información:

- Nivel económico: representa el nivel de recursos que tiene una comuna. Esta capa de información esta formada con datos del estudio llamado Índice de Desarrollo Comunal [35], hecho por la Universidad Autónoma de Chile. El estudio forma este índice económico considerando dependencia etaria, número de empresas por habitante e ingresos propios permanentes municipales.
- Potencial económico: representa la vocación productiva de una comuna, es decir, las aptitudes y posibilidades económicas de una zona. Esta capa de información esta formada por 2 variables: el número de empresas por rubro económico y el número de personas que trabajan en cierta actividad económica por comuna. Esta información es obtenida de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [36], la cual se basa de información del Sistema de Impuestos Internos (SII) y del Instituto Nacional de Estadísticas (INE). En particular, se recopila información del rubro agrícola, ganadero, silvicultura y pesquero, ya que son rubros económicos a los cuales están más familiarizados las comunidades aisladas [37].
- Costo de la aplicación del proyecto: representa el costo de inversión del proyecto. Esta capa es formada con los costos de inversión tipo, es decir, tomando en cuenta los costos por kW de cada una de las energías usadas en el proyecto (ya sea solar o eólica) y equipamiento de almacenamiento, para satisfacer la demanda esperada de cada comunidad. Estos costos son obtenidos del Informe de Costos de Tecnologías de Generación, hecho por la Comisión Nacional de Energía el año 2020 [38].

Dimensión medioambiental

En esta dimensión se recolecta información con un enfoque medioambiental, tal que las comunidades seleccionadas tengan un proyecto de electrificación que sea sustentable con su entorno. En esta dimensión se consideran las siguientes capas de información:

- Áreas protegidas: capa de información que representa las principales áreas de conservación del país, tanto marino como terrestre, público o privado. En esta capa se encuentran las Zonas de Interés Turístico de SERNATUR, los acuíferos protegidos de DGA,

los bienes nacionales protegidos del MBN, áreas marinas protegidas de SUBPESCA, entre otras.

- Nivel de contaminación atmosférica: esta capa de información intenta representar la calidad del aire de las comunas del país. Sin embargo, no fue posible encontrar una base de datos para formar este tipo de capa. La importancia de esta capa radicaba en filtrar comunas con altos niveles de contaminación, para así abastecer localidades aisladas con energías limpias, virtud de las micro-redes, ayudando a mejorar la calidad del aire.

Dimensión social

En esta dimensión se presenta información a nivel social con la cual se pueda establecer una estructura de gestión local y un plan futuro de socialización de proyectos. Las capas de información importantes para la selección de comunidades son:

- Rango etario: representa la edad de la población de una localidad. Esta capa de información se formó con datos del CENSO 2017, del Instituto Nacional de Estadísticas, el cual se encuentra representado por “entidades” territoriales. Sin embargo, existen muchas localidades que no contienen esta información, por lo cual no será considerada en el avance de este trabajo. No obstante, es un indicador que puede tener cierta importancia a la hora de decidir que localidad escoger por sobre otra en caso de haber igualdad de condiciones, ya que personas mayores de edad, por lo general, tienen un aprendizaje más lento sobre nuevas tecnologías y podría haber problemas en cuanto a la sostenibilidad del proyecto a largo plazo. Por lo tanto, se le daría la oportunidad a localidades con habitantes más jóvenes.
- Nivel de desarrollo humano: representa la realidad, en distintos aspectos, de la calidad de vida de una población. Se puede utilizar el Índice de Desarrollo Humano (IDH), creado por el Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo. Sin embargo, se opta por formar esta capa con el estudio del Índice de Desarrollo Comunal hecho por la Universidad Autónoma de Chile, el cual forma un indicador, con el mismo nombre del estudio, tomando en cuenta 3 dimensiones: bienestar social, economía y educación. Este índice asigna un nivel de desarrollo a todas las comunas del país, los cuales están definidos de la siguiente forma: bajo, medio bajo, medio, medio alto y alto.
- Tipo de comunidad: como se dijo en la capa de número de viviendas/personas, existe una categorización espacial llamada 'entidad'. Esta contiene una serie de información, como por ejemplo el número de personas, rango etario, el número de viviendas, ubicación, etc., donde una de ellas define el tipo de entidad (comunidad), las cuales se diferencian entre sí dependiendo de las características de su poblamiento, su denominación y las funciones que desarrollan en el ámbito territorial. Las categorías de entidad son: aldea, caserío, asentamiento minero, asentamiento pesquero, fundo-estancia-hacienda, parcela-hijuela, parcela de agrado, comunidad indígena, campamento, veranada-majada-aguada, otros e indeterminada [39].

- Comunas susceptibles a Zonas Rezagadas: toda comuna que presenta una condición de aislamiento (dificultad a accesibilidad y conectividad física, dispersión en distribución territorial de habitantes, baja densidad poblacional, baja presencia y cobertura de servicios básicos y públicos) y brecha social (distancia entre pobreza comunal y pobreza regional). Esta capa es formada con datos del “Informe de Comunas Susceptibles a ser Propuestas como Zonas Rezagadas en Materia Social 2021”, de la SUBDERE, donde se presentan un total de 135 comunas que cumplen con esta condición [40].

3.2.2. Aplicación de filtros de selección: obtención de comunidades

Tomando en cuenta las capas de información analizadas, el procedimiento a seguir para la obtención de las localidades aisladas se dividirá en 2 partes: en primer lugar habrá una preselección de comunas, aplicando la definición de enclave estratégico, y luego habrá una selección de localidades, aplicando una serie de filtros.

Preselección de comunas

Para la preselección de comunas, se escogen las capas de información que definen ser un enclave estratégico. Es decir, se tienen que cruzar las siguientes capas:

- Suministro energético: comunas que no presentan un 100 % de cobertura eléctrica. Además, se dejan fuera las comunas que no existe base de datos de alimentadores de distribución.
- Comunas susceptibles a Zonas Rezagadas: comunas que cumplen condición de aislamiento y brecha social.
- Potencial económico: comunas que contienen empresas y trabajadores del rubro agrícola, ganadero, silvicultura y pesca.

Selección de localidades

Una vez identificadas todas las localidades preseleccionadas que corresponden a la definición de 'enclave estratégico', se debe diseñar filtros que permitan seleccionar comunidades que cumplan las condiciones básicas para el desarrollo de un proyecto de micro-red.

Dado que la mayoría de datos se encuentra a nivel comunal y no a nivel entidad, para la selección de localidades se seguirá la siguiente estrategia, la cual se divide en 2 partes:

1. Selección de comunas

De la preselección de comunas, se aplicarán los filtros que se definen a continuación:

- Comunas que presenten bajo índice de desarrollo y económico. En particular, el Índice de Desarrollo Comunal tiene similitudes con el Índice de Desarrollo Humano

(IDH) a nivel comunal. Por lo tanto, se escoge el IDC de rango más bajo. Además, este tiene una relación directa con el nivel económico comunal.

- Comunas con mayor potencial económico en micro-empresas (empresas con 1 a 9 trabajadores contratados [41]), es decir, comunas con mayor vocación productiva local. Para ello, se hace una sub-capa a partir del número de trabajadores por rubro y el número de empresas por rubro, dividiendo el número de trabajadores entre el número de empresas, obteniendo el promedio de trabajadores por empresa. Por lo tanto, se escogen las comunas que tengan un promedio de trabajadores por empresa menor o igual a 9.
- Comunas que tengan baja cobertura eléctrica. En particular, se escogerán comunas que tengan más de 100 personas sin acceso a energía, lo que equivale a unas 25 viviendas, aproximadamente, si se consideran familias de 4 personas⁴. Esto permite que hayan, como máximo, 2 comunidades de 10 viviendas cada una por comuna.

2. Selección de localidades

La selección de localidades, serán las entidades que estén dentro de las comunas seleccionadas que cumplan con los siguientes filtros de selección:

- Entidades que tengan como mínimo 40 personas, que equivale a unas 10 viviendas si se consideran hogares de 4 personas. Este criterio se respalda con el informe de micro-redes 2013 del Centro de Energía, FCFM [6].
- Entidades que estén catalogadas como aldea, caserío, asentamiento pesquero o comunidad indígena. La idea de esto es asegurarse de que la gente viva en su comunidad la mayor parte del año, que necesite de un proyecto de micro-red y que sean viviendas reguladas. Es por ello que se dejan de lado toda entidad catalogada como fundo, parcela, estancia, veranada, campamento, etc.
- Entidades que estén alejadas 10 kilómetros aprox., o más, de alimentadores eléctricos de distribución. Este criterio se respalda con el informe de micro-redes 2013[6], donde las distancias mínimas de las comunidades a la red, por macrozona, fueron cercano a este valor. La idea es escoger localidades que estén lo más aislada posible, que tengan bastante dificultad para conectarse a una red de distribución.
- Entidades con potencial energético suficiente para desarrollar un proyecto de micro-red.

3.2.3. Definición de criterios para priorización de comunidades

A la hora de priorizar comunidades, existe una variedad de criterios que se podrían considerar en diferentes aspectos, ya sean técnicos, económicos o sociales, etc., donde los criterios escogidos dependerán netamente del objetivo que tenga el tomador de decisiones.

En [25] se reconoce que los criterios económicos son los más importantes a la hora de desarrollar un proyecto de micro-red. Por lo tanto, se escoge como primer indicador la inversión

⁴El tamaño medio de un hogar pasó de 4,4 personas por hogar a 3,1 en el periodo 1982-2017, según se registra en el Censo 2017.

inicial por habitante (Inv_0) de proyecto de micro-red, donde el criterio será que a medida que disminuya Inv_0 , la solución es más conveniente económicamente. Esto permite una asignación de recursos eficientes desde el punto de vista económico, sin embargo, solo se estaría considerando este aspecto, habiendo otras variables que son importantes en la toma de decisión.

Siguiendo la línea de asignar los recursos de manera eficiente, el segundo indicador será el Índice de Desarrollo Comunal (IDC), donde el criterio será que a medida que una localidad tenga un menor IDC, será considerada primero que otras localidades con un IDC mayor. Con esto, tendrían prioridad las localidades más desfavorecidas, a nivel de desarrollo, del país.

No obstante, otro indicador podría ser el potencial económico en micro-empresas, donde el criterio sería que si una comunidad tiene mayor potencial en micro-empresas, sería considerada primero que otras localidades con un menor potencial. Este criterio también va de la mano con una asignación de recursos eficiente, ya que se estaría ayudando, con prioridad, a comunidades con una mayor vocación productiva local.

El IDC es un índice que se obtiene el proceso de recolección de datos y formación de capas de información, por lo tanto es un dato que ya se tiene. Por el contrario, se carece del costo de inversión inicial, de manera que se debe obtener a partir de los datos recopilados.

Para obtener el costo de inversión inicial de proyecto de micro-red de cada comunidad, primero hay que obtener el consumo energético de esta. Para el cálculo de la demanda energética por comunidad, se utiliza como base el consumo residencial por zona térmica del Informe Final Caracterización Residencial 2018 [34], cuyo dato se encuentra en [kWh/vivienda/año]. Dado que se pretende trabajar con número habitantes por localidad, entonces este dato debe ser pasado a [kWh/persona/año]. Por lo tanto, se debe dividir en 4, ya que se considera que cada vivienda esta compuesta de 4 personas. Por último, este valor resultante se pondera por la cantidad de personas que existe en la localidad seleccionada, quedando el consumo de cada localidad en [kWh/año].

Para el cálculo del costo de inversión inicial se usan los costos de inversión unitarios por tecnología de generación, del informe de la Comisión Nacional de Energía [38]. Estos costos son los de tecnología solar con almacenamiento y los de tecnología eólica con almacenamiento, los cuales se muestran en la tabla 3.1. Sin embargo, una micro-red no esta compuesta solo de tecnologías solar y eólica con almacenamiento, sino que también presenta generadores diesel como apoyo. Por lo tanto, este costo de inversión inicial es un costo aproximado al real.

Tecnología	Costo de inversión referencial [US\$/kW]
Solar con almacenamiento	1539
Eólica con almacenamiento	1891

Tabla 3.1: Costos de inversión referencial por tecnología de generación.

Para cada proyecto de micro-red, hay que saber cuanto es la potencia solar y eólica necesaria por comunidad. Para calcular esto, se seguirán los siguiente pasos:

1. Se debe definir la contribución eólica y solar para abastecer la demanda por comunidad.

Para esto se calculará un porcentaje de demanda abastecida por cada tipo de generación, el cual dependerá de la razón entre el potencial eólico y solar por comunidad.

2. Se calcula el área necesaria por cada tipo de generación. Esto se realiza con la siguiente ecuación:

$$A_{solar/eolica} = \frac{Consumo/365}{E_{solar/eolica}} = \frac{[kWh/dia]}{[kWh/m^2/dia]} = [m^2] \quad (3.5)$$

Mencionar que se ha usado el '/' como un 'o', en los subíndices, para no repetir la ecuación.

3. Se debe escoger un generador para cada tipo de tecnología para tener valores de área y potencia por tipo de generación. En particular, se escogen el siguiente panel solar y aerogenerador:

Generador	Ancho [mm] x Largo [mm]	Diámetro rotor [m]	Potencia [kW]
Jinko Solar JKM410M-72M	1002 x 2008	-	0,41
Skystream 3.7	-	3,72	2,40

Tabla 3.2: Valores técnicos de panel solar Jinko Solar [30] y aerogenerador Skystream [42].

Según los datos de la tabla 3.2, las áreas por equipo de generación son:

$$A_{panel} = 1,002 \cdot 2,008 = 2,0120[m^2] \quad (3.6)$$

$$A_{aerogenerador} = 3,72^2 \cdot a \cdot b = 3,72^2 \cdot 5 \cdot 7 = 484,3440[m^2] \quad (3.7)$$

Donde 'a' y 'b' son los múltiplos de diámetros de rotor en la dirección de viento dominante y perpendicular a viento dominante, respectivamente [31].

4. Finalmente, los kW por tipo de generación se calculan con la siguiente ecuación:

$$P_{solar/eolica} = \frac{A_{solar/eolica}}{A_{panel/aerogenerador}} \cdot P_{panel/aerogenerador} \quad (3.8)$$

Donde $P_{panel/aerogenerador}$ es la potencia del panel o aerogenerador que se observa en la tabla 3.2.

Obtenida la potencia necesaria por cada tipo de generación, los costos de inversión inicial se obtienen sumando la ponderación de potencia de cada tecnología con su respectivo costo unitario, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_{inversion} = P_{solar} \cdot C_{solar} + P_{eolica} \cdot C_{eolico} = [US\$] \quad (3.9)$$

3.2.4. Aplicación de criterios de priorización

La priorización se realizará con la optimización multi-objetivo denominado Frente de Pareto (u Óptimo de Pareto), el cual menciona que las soluciones que forman parte de esta frontera no pueden mejorarse sin que empeore cualquier otra solución de dicho conjunto.

Para priorizar cada comunidad con Pareto Óptimo, primero se debe graficar cada localidad seleccionada con sus respectivos indicadores (IDC e inversión inicial por habitante). Luego se debe seguir los siguientes pasos:

1. Identificar el Frente de Pareto del total de comunidades de acuerdo a los criterios de priorización, es decir, localidades con un menor IDC e inversión inicial por habitante.
2. Priorizar las localidades pertenecientes al Frente de Pareto usando solo el IDC.
3. Identificar el Frente de Pareto de las comunidades restantes de acuerdo a los criterios de priorización.
4. Repetir paso 2.
5. Si ya no hay más comunidades por priorizar, fin. Sino, volver al paso 3.

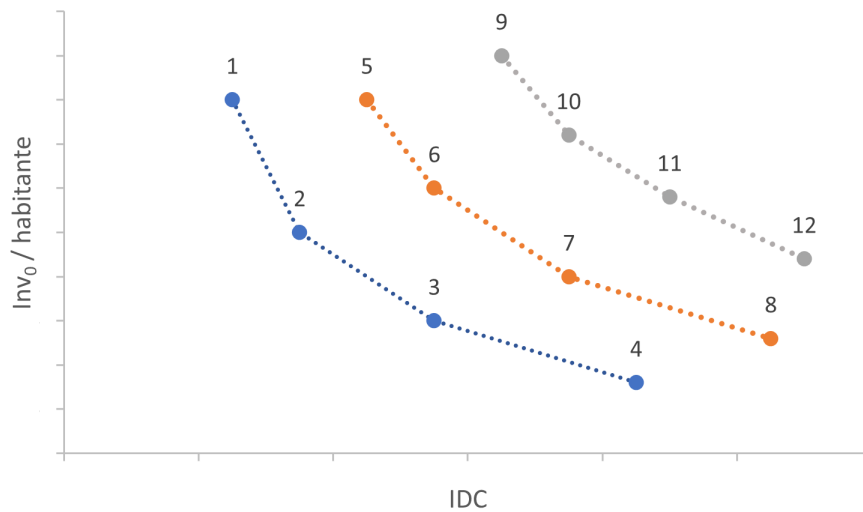


Figura 3.2: Ejemplo de priorización por Pareto Óptimo.

En la figura 3.2 se puede observar un ejemplo de la priorización por Pareto Óptimo de acuerdo a los criterios escogidos. En él se puede apreciar que el conjunto de comunidades en azul, naranja y gris corresponde al primer, segundo y tercer Frente de Pareto, donde cada uno es priorizado utilizando solo el IDC.

Capítulo 4

Resultados y análisis

4.1. Resultados

La presente sección tiene como objetivo presentar los resultados al aplicar la metodología propuesta para la preselección, selección y priorización de comunidades, vistas en el capítulo anterior.

4.1.1. Preselección de comunas

Las comunas preseleccionadas deben cumplir con características básicas que definen ser un enclave estratégico, es decir, deben ser comunas que cumplan condición de aislamiento, que no presenten un 100 % de cobertura eléctrica y que tengan potencial económico en áreas económicas como la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca.

Según el informe 'Comunas Susceptibles a ser Zona Rezagada'[40], hay 135 comunas, a lo largo del país, que cumplen la condición de aislamiento. Por lo tanto, esta lista de comunas se escoge como la lista de comunas inicial, la cual se completa con información de las diferentes capas de información, para así formar la tabla base A.1 que se observa en el Anexo A. Esta tabla contiene el nombre de cada comuna junto a una lista de indicadores, como lo son el número de habitantes ('Habitantes'), nivel económico ('Economía'), el nivel de desarrollo comunal ('IDC', 'Rango'), el nivel de cobertura eléctrica ('Cobertura'), el número de habitantes sin electricidad ('Habitantes Sin Energía'), el número de empresas ('N°Empresas'), el número de trabajadores ('N°Trabajadores') y el número de trabajadores por empresa ('Trab./Empre.'), de los sectores económicos mencionados.

Al cruzar la información que define ser un enclave estratégico, se obtiene un total de 126 comunas preseleccionadas. Sin embargo, solo se pudo obtener la base de datos de alimentadores de distribución en 11 regiones, desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región del Biobío, lo cual reduce a 80 las comunas preseleccionadas.

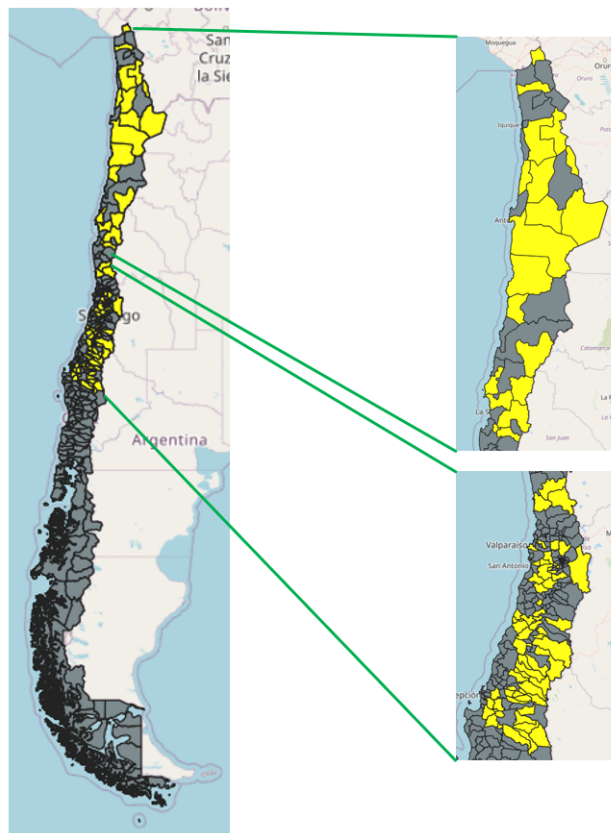


Figura 4.1: Preselección de comunas.

En la figura 4.1 se observan las 80 comunas preseleccionadas en color amarillo, a lo largo del país, las cuales se distribuyen por región de la siguiente forma:

Región	N° comunas	Habitantes	Habitantes sin energía
Región de Tarapacá	2	25007	252
Región de Antofagasta	4	411372	2052
Región de Atacama	4	38578	1278
Región de Coquimbo	6	124633	2044
Región de Valparaíso	4	456864	299
Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	3	52159	222
Región del Maule	16	306594	1449
Región del Biobío	16	415193	4775
Región Metropolitana de Santiago	13	603217	1787
Región de Arica y Parinacota	2	4020	882
Región de Ñuble	10	195163	560
Total	80	2632800	15600

Tabla 4.1: Número de comunas preseleccionadas por región.

En la tabla 4.1 se puede apreciar el número de comunas preseleccionadas por región, junto al número de habitantes y al número de habitantes sin electricidad. En esta se puede observar que la mayor concentración de comunas preseleccionadas se encuentran en las regiones Maule,

Biobío y Metropolitana de Santiago. Además, se ve que la cantidad de habitantes sin energía es mayor en la zona norte y sur del país, específicamente en las regiones de Antofagasta, Coquimbo y Biobío. El detalle de la tabla se puede ver en la tabla B.1 del Anexo B, en la cual se puede apreciar el nombre de la comuna preseleccionada y a que región del país corresponde.

4.1.2. Selección de comunidades

Selección de comunas

A la preselección de comunas se le aplican los filtros definidos en el capítulo anterior, es decir, comunas con un IDC de rango 'bajo', con baja cobertura eléctrica y con potencial económico en microempresas. La aplicación de esta serie de filtros resulta en la siguiente lista de comunas seleccionadas:

ID	Región	Comuna	Rango	Habitantes sin energía	Trab./Empre.
2	Región del Biobío	Alto Biobío	Bajo	1861	0,27
13	Región de Arica y Parinacota	Camarones	Bajo	503	0,16
34	Región del Biobío	Florida	Bajo	386	4,54
36	Región de Atacama	Freirina	Bajo	482	0,92
92	Región de Arica y Parinacota	Putre	Bajo	379	0,38
97	Región del Biobío	Quilaco	Bajo	108	2,58
98	Región del Biobío	Quilleco	Bajo	137	4,42
120	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	Bajo	418	1,14
124	Región del Biobío	Santa Juana	Bajo	173	5,73

Tabla 4.2: Comunas seleccionadas.

La tabla 4.2 muestra las comunas seleccionadas con sus respectivos atributos, como lo son el rango del IDC, la cantidad de habitantes sin energía y el número de trabajadores por empresa. En esta, se puede apreciar que las comunas con mayor cantidad de habitantes sin energía son Alto Biobío, Camarones y Freirina, de las regiones Biobío, Arica y Atacama, respectivamente. Además, las comunas con mayor cantidad de trabajadores por empresa son las comunas de Florida, Quileco y Santa Juana, todas de la Región del Biobío. Los datos restantes se encuentran en la tabla A.1 del Anexo A.

Selección de localidades

Las comunas seleccionadas presentan un total de 756 localidades/entidades. A estas se les aplican 2 de los 3 filtros definidos en el capítulo anterior, es decir, entidades que cuenten con 40 personas como mínimo y que sean definidas como aldea, caserío o comunidad indígena. Esto da como resultado una preselección de 66 localidades que se encuentran en el Anexo C, donde la tabla C.1 contiene el nombre de la localidad y su distancia a la red.

Luego, se aplica el filtro de distancia a la red tomando una distancia mínima de 9 [km]¹, lo cual da como resultado la lista de 27 localidades seleccionadas que se encuentran en el Anexo D, donde la tabla D.1 contiene el nombre de la localidad, su ubicación en coordenadas geográficas, el número de habitantes y datos del potencial energético. En esta se observa que las localidades se encuentran distribuidas en las comunas Camarones, Putre, Freirina y Alto Biobío, las cuales corresponden a entidades del tipo caserío y comunidades indígenas. También, a simple vista, se aprecia que las localidades con mayor cantidad de habitantes se encuentran en la comuna de Alto Biobío, donde 2 de ellas superan los 300 habitantes. Sin embargo, las localidades seleccionadas con mayor potencial energético se encuentran en las comunas de Camarones y Putre.

La determinación de la ubicación puntual de cada una de las entidades/localidades se realizó de la siguiente forma:

- El centroide de cada entidad/localidad es la ubicación puntual de esta.
- En caso de haber una comunidad indígena, comunidad con electrificación permanente o parcial, dentro del área de la entidad, se escoge la ubicación de esta comunidad como la ubicación puntual de la entidad.

En las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se pueden apreciar el emplazamiento de las localidades seleccionadas en el territorio nacional. Según como dice la leyenda de la figura 4.2, las áreas en color amarillo corresponde a las localidades seleccionadas, donde cada una de ellas tiene ubicado su centroide en color rojo. Además, se observan unas áreas en color naranja, que corresponden a las localidades seleccionadas antes de aplicarles el último filtro de distancia a líneas de distribución (color rosado). Y, finalmente, se observa la localización de comunidades con electrificación parcial o permanente (obtenidas de la base de datos del Mapa de Vulnerabilidad Energética) en color verde o azul, respectivamente, y, además, la localización de comunidades indígenas en color negro.

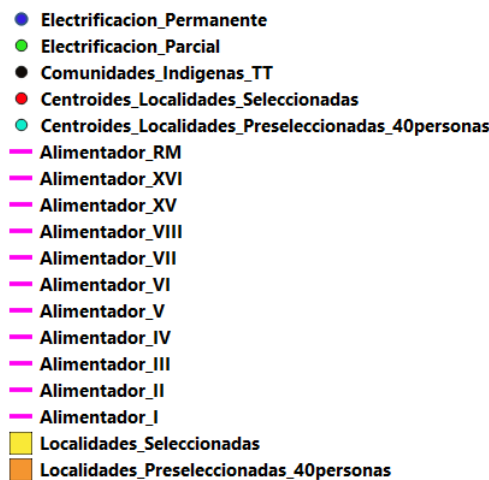


Figura 4.2: Leyenda para figuras 4.3, 4.4 y 4.5

¹Se escoge 9 [km] y no 10 [km] dado que hay 2 localidades (Caleta Camarones y El Avellano) que están muy cercanas a este valor, quedando las demás mucho más alejadas, muy por debajo de los 10 [km] (ver tabla C.1 del Anexo C).

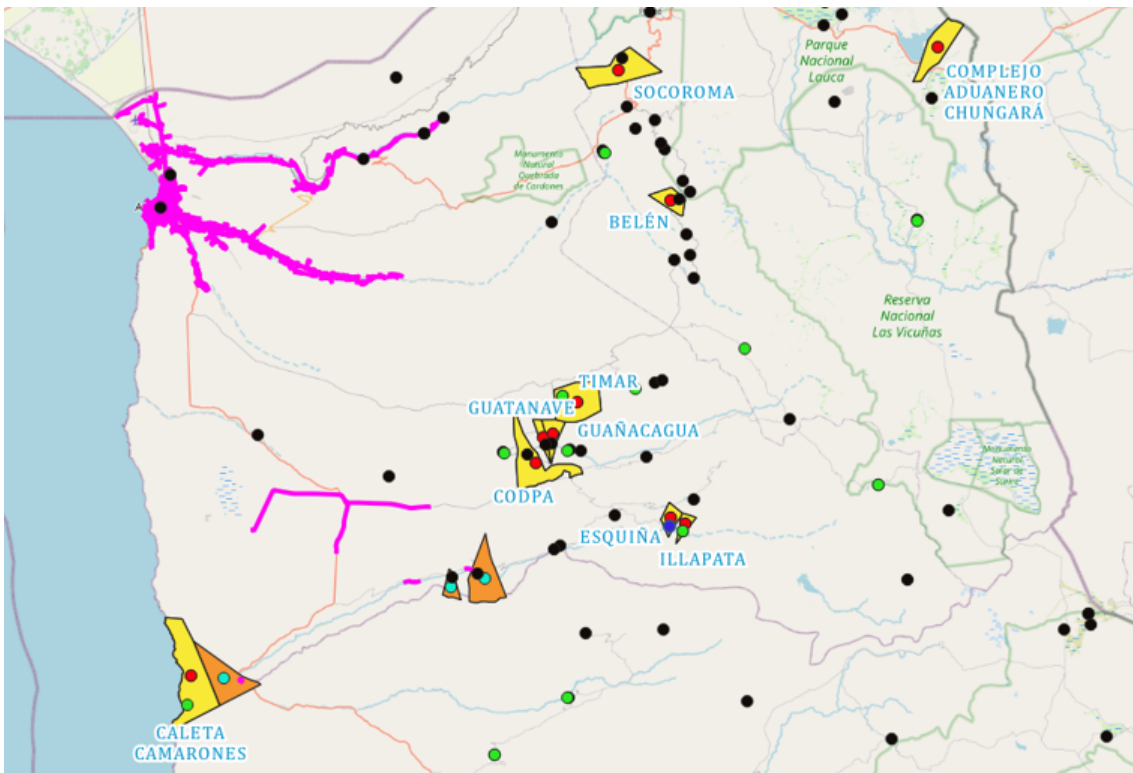


Figura 4.3: Localidades seleccionadas de la Región de Arica y Parinacota.

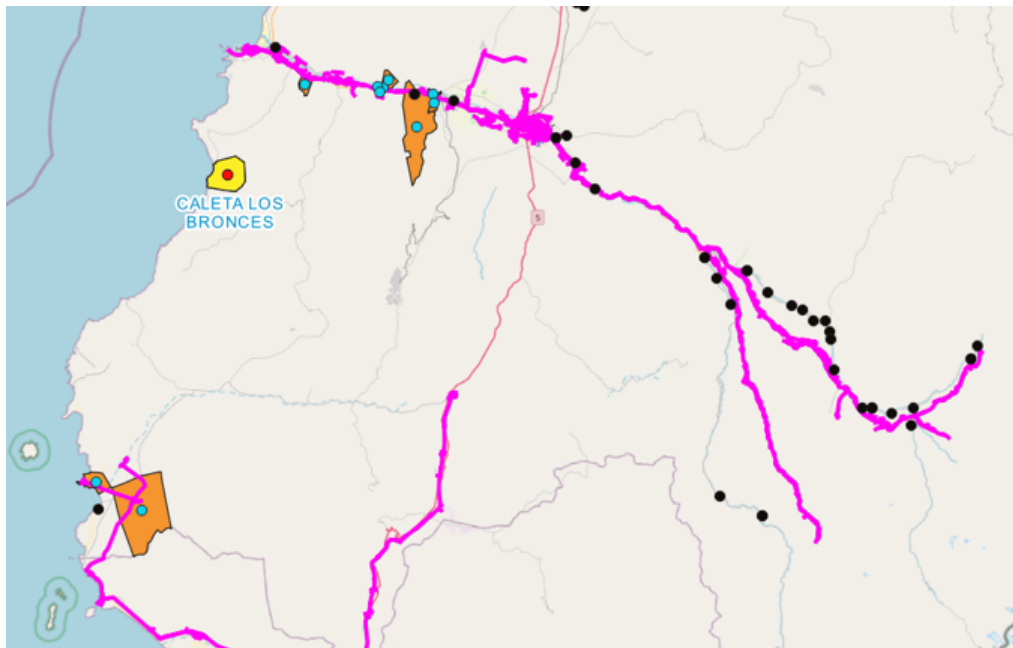


Figura 4.4: Localidades seleccionadas de la Región de Atacama.

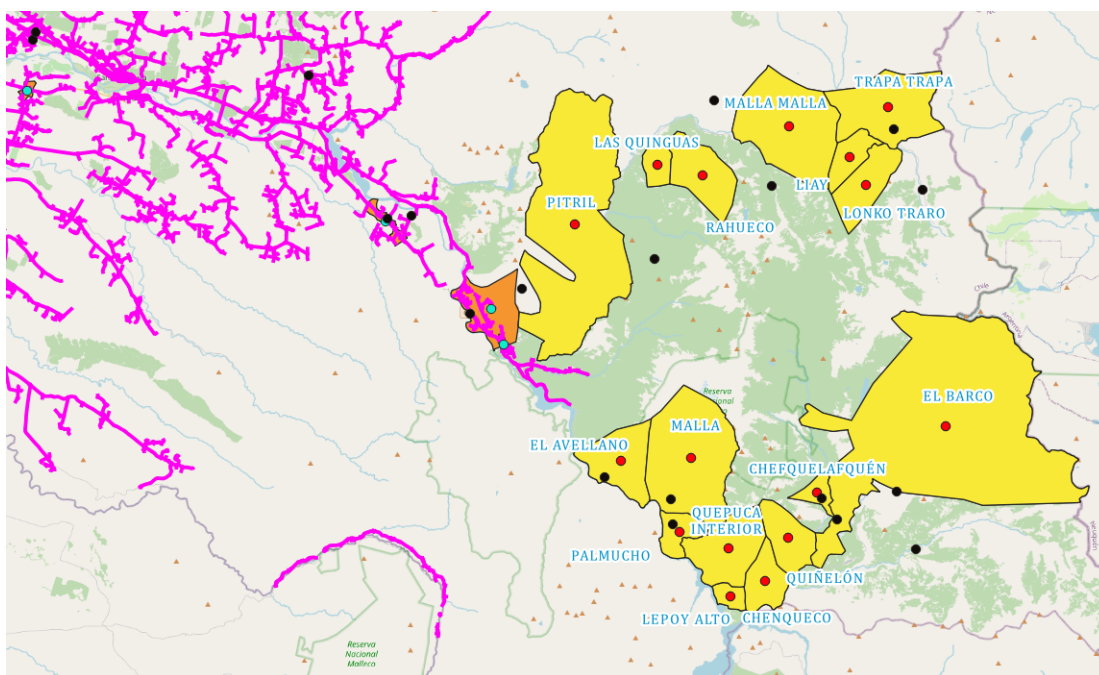


Figura 4.5: Localidades seleccionadas de la Región del Biobío.

4.1.3. Comunidades descartadas

Como se dijo anteriormente, las comunas seleccionadas presentan un total de 756 localidades, según el Censo 2017. Sin embargo, solo 187 comunidades presentan la información completa para la aplicación de filtros de selección.

Dejando a un lado las 27 comunidades seleccionadas, son 160 las localidades que fueron descartadas en total. La distribución de estas se presentan en la tabla 4.3.

ID	Región	Comuna	N° Localidades	N° Habitantes
2	Región del Biobío	Alto Biobío	0	0
13	Región de Arica y Parinacota	Camarones	25	640
36	Región de Atacama	Freirina	39	2390
120	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	96	9669
34	Región del Biobío	Florida	0	0
92	Región de Arica y Parinacota	Putre	0	0
124	Región del Biobío	Santa Juana	0	0
98	Región del Biobío	Quilleco	0	0
97	Región del Biobío	Quilaco	0	0

Tabla 4.3: Distribución de localidades descartadas por comuna.

En las tablas 4.4, 4.5 y 4.6 se puede ver los promedios, máximos y mínimos de las 160 localidades descartadas por comuna.

Comuna	Habitantes promedio	Habitantes máximo	Localidad	Habitantes mínimo	Localidad
Camarones	25,60	166	Cuya	1	Planta Solar
Freirina	61,28	553	Maitencillo	4	Caleta Los Burros
San Pedro	100,72	593	San Pedro	8	Indeterminada

Tabla 4.4: Número de habitantes promedio, máximos y mínimos de localidades descartadas por comuna.

Comuna	Energía solar promedio [kWh/m ² /día]	Energía solar máxima [kWh/m ² /día]	Localidad	Energía solar mínima [kWh/m ² /día]	Localidad
Camarones	1,3730	1,4302	Indeterminada	1,2655	Taltape
Freirina	1,1243	1,2299	Indeterminada	0,9372	Caleta Ardiles
San Pedro	1,0542	1,0677	Santa Rosa de la Sierra Poniente	1,0343	Corneche Bajo

Tabla 4.5: Energía solar promedio, máxima y mínima de localidades descartadas por comuna.

Comuna	Distancia promedio [km]	Distancia máxima [km]	Localidad	Distancia mínima [km]	Localidad
Camarones	20,8715	72,0146	Parcohaylla	0,2557	Planta Solar
Freirina	7,8291	35,4662	Indeterminada	0,0028	Santa Teresa
San Pedro	0,3741	1,3555	Indeterminada	0,0018	Loica Arriba

Tabla 4.6: Distancia a la red promedio, máxima y mínima de localidades descartadas por comuna.

Sin embargo, de las 160 localidades descartadas, solo 20 de ellas pueden llegar a ser seleccionadas como enclave estratégico, porque cumplen con los 2 primeros filtros de selección y, además, cuentan con la información de potencial energético. En la tabla E.1 del anexo E se muestran las localidades descartadas con potencial a ser enclave estratégico, la cual presenta el nombre de cada comunidad, junto al número de habitantes, potencial eólico, potencial solar y distancia a la que se encuentra de la red eléctrica.

4.1.4. Priorización de comunidades seleccionadas

Antes de presentar la priorización de las localidades seleccionadas, es necesario mostrar los resultados del indicador costo de inversión inicial por habitante (Inv_0) de cada comunidad.

Debido al bajo potencial eólico en todas las comunidades, en comparación al potencial solar, la razón entre el potencial eólico y solar es menor al 1%. Por lo tanto, para tener un poco más presente la energía eólica, se fija en un 5% la contribución eólica y un 95% la solar (porcentajes acordes a micro-redes existentes, según [6]), junto a que el precio del dólar es de 790 [CLP/US\$]. Dicho esto, los resultados de los costos de inversión inicial por habitante de cada localidad se muestra en la siguiente figura:

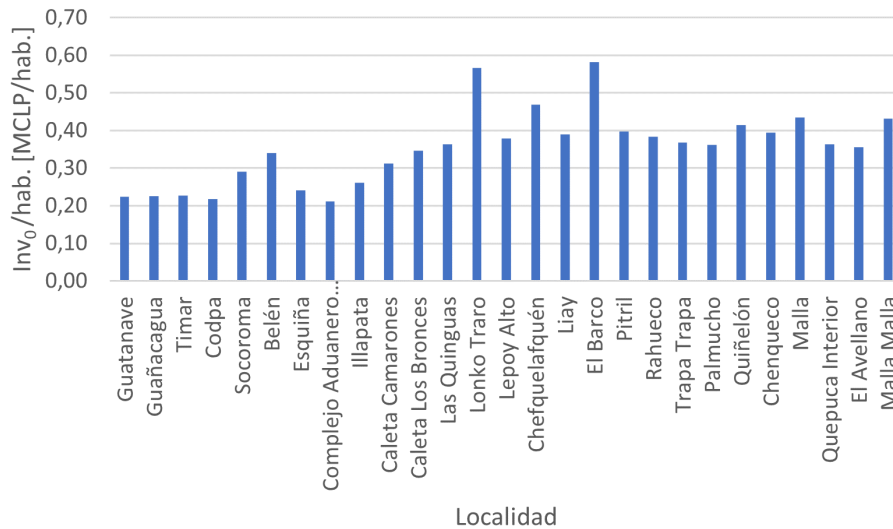


Figura 4.6: Costos de inversión inicial por habitante de cada comunidad.

En la figura 4.6 se observan los costos de inversión inicial por habitante, en donde se aprecia que la comunidad El Barco presenta el mayor $Inv_0/hab.$. Esto se debe, principalmente, a que es una de las localidades con menor potencial energético, lo que se traduce en que requiere más equipos de generación y, por ende, mayores son los costos. El detalle de este cálculo se encuentra en la tabla F.1 del Anexo F.

Ya presentado los costos de inversión inicial por habitante de cada comunidad, se procede a mostrar los resultados de la priorización de comunidades seleccionadas, lo cual se enseña en la siguiente tabla:

Localidad	Comuna	Costo/hab. [MCLP/hab.]	IDC	N° Empresas	Priorización IDC	Priorización N°Empresas
El Avellano	Alto Biobío	0,355	0,158	11	1	12
Codpa	Camarones	0,218	0,211	57	2	1
Complejo Aduanero Chungará	Putre	0,211	0,260	26	3	2
Palmucho	Alto Biobío	0,362	0,158	11	4	13
Guatanave	Camarones	0,224	0,211	57	5	3
Las Quinguas	Alto Biobío	0,363	0,158	11	6	14
Guañacagua	Camarones	0,225	0,211	57	7	4
Quepuca Interior	Alto Biobío	0,363	0,158	11	8	15
Timar	Camarones	0,227	0,211	57	9	5
Trapa Trapa	Alto Biobío	0,368	0,158	11	10	16
Esquiña	Camarones	0,241	0,211	57	11	6
Lepoy Alto	Alto Biobío	0,380	0,158	11	12	17
Illapata	Camarones	0,262	0,211	57	13	7
Rahueco	Alto Biobío	0,383	0,158	11	14	18
Caleta Camarones	Camarones	0,312	0,211	57	15	8
Socoroma	Putre	0,290	0,260	26	16	9
Liay	Alto Biobío	0,389	0,158	11	17	19
Belén	Putre	0,340	0,260	26	18	11
Chenqueco	Alto Biobío	0,394	0,158	11	19	20
Caleta Los Bronces	Freirina	0,346	0,280	38	20	10
Pitril	Alto Biobío	0,398	0,158	11	21	21
Quiñelón	Alto Biobío	0,415	0,158	11	22	22
Malla Malla	Alto Biobío	0,432	0,158	11	23	23
Malla	Alto Biobío	0,435	0,158	11	24	24
Chefquelafquén	Alto Biobío	0,468	0,158	11	25	25
Lonko Traro	Alto Biobío	0,566	0,158	11	26	26
El Barco	Alto Biobío	0,582	0,158	11	27	27

Tabla 4.7: Resultados de la priorización de comunidades según indicador IDC o N°Empresa.

En la tabla 4.7 se observa la priorización de las localidades seleccionadas usando Óptimo de Pareto, junto a sus respectivos indicadores IDC e Inv_0 . Además, se agrega el indicador número de empresas (N°Empresas) para realizar una priorización alternativa. El criterio que se usa con este indicador es que las localidades con mayor presencia de empresas tienen prioridad.

4.2. Análisis de resultados

La siguiente sección tiene por objeto presentar un análisis estadístico cualitativo y cuantitativo de los resultados obtenidos de la preselección, selección y priorización de enclaves estratégicos.

Para realizar el análisis será necesario definir algunas macrozonas, las cuales tendrán la siguiente distribución de regiones del país:

1. Macrozona norte: Región de Arica y Parinacota, Región de Tarapacá y Región de Antofagasta.
2. Macrozona centro-norte: Región de Atacama y Región de Coquimbo.
3. Macrozona centro: Región de Valparaíso, Región Metropolitana de Santiago, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región del Maule.
4. Macrozona sur: Región de Ñuble y Región del Biobío.

4.2.1. Preselección de comunas

En la figura 4.7 se observa la concentración de comunas preseleccionadas por macrozona, con un total de 80 comunas. De aquí se desprende que la macrozona centro es la que posee mayor cantidad de comunas preseleccionadas con potencial a contener 'enclaves estratégicos'. Por el contrario, la menor cantidad de comunas preseleccionadas se concentran en la macrozona norte, seguida muy de cerca de la centro-norte.

Sin embargo, en la figura 4.8 se observa la cantidad de habitantes sin cobertura eléctrica de las comunas preseleccionadas por macrozona, de la cual se aprecia que la macrozona sur es la que posee mayor cantidad de habitantes sin electricidad. También se observa que el resto de macrozonas posee una cantidad de habitantes sin energía muy similares. Todo esto se debe a la densidad de población y cobertura eléctrica existente, donde en la zona centro, a pesar de contener una densidad poblacional muy alta, posee una cobertura eléctrica superior a las demás, lo cual genera que tenga una cantidad de habitantes sin energía similar a las macrozonas norte y centro-norte. En viceversa, la macrozona centro-norte es la que tiene menor densidad poblacional, pero una cobertura eléctrica inferior.

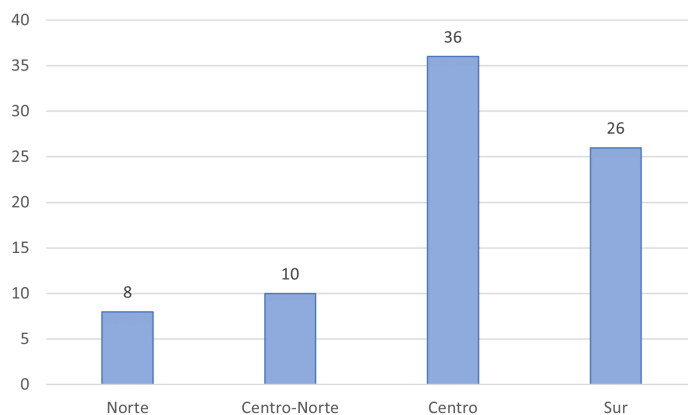


Figura 4.7: Distribución de comunas preseleccionadas por macrozona.

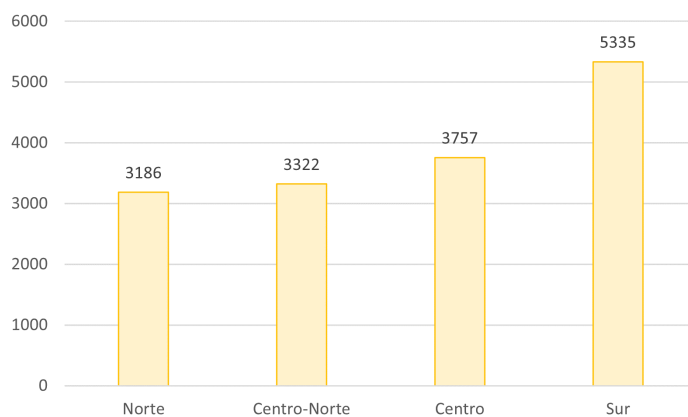


Figura 4.8: Cantidad de habitantes sin electricidad de comunas preseleccionadas por macrozona.

En las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se muestran los gráficos de distribución de comunas preseleccionadas por macrozona según los atributos recopilados del proceso de formación de capas.

Del primer atributo (ver figura 4.9) se observa que, en todas las macrozonas, las comunas preseleccionadas poseen, en su mayoría, un IDC bajo o medio-bajo, siendo casi nulas las con un IDC medio-alto o alto, lo cual habla de un cruce de información más que aceptable de los datos obtenidos de los estudios Índice de Desarrollo Comunal y del Informe de Comunas Susceptibles a ser Zona Rezagada. Además, se observa que en la macrozona sur existe una mayor cantidad de comunas preseleccionadas con un IDC bajo. En cambio, las demás macrozonas poseen una cantidad similar de comunas preseleccionadas con este mismo IDC. Todo esto da a entender que el atributo IDC es un filtro fuerte para la selección de comunas, lo cual se aprecia en la figura 4.12, donde se observa la misma tendencia en la distribución de comunas.

Del segundo atributo (ver figura 4.10) se aprecia que, en general, existe casi la misma cantidad de comunas preseleccionadas con una población sin cobertura eléctrica menor a 100 que mayor a 100 habitantes. Además se aprecia que en la macrozona centro es donde existe la

mayor cantidad de comunas con una población sin energía menor a 100 habitantes, lo cual se debe a que posee comunas con un mejor cobertura. Todo esto da a entender que el atributo habitantes sin energía es un filtro de selección medianamente fuerte, lo cual se aprecia al compararlo con la figura 4.12.

Del tercer atributo (ver figura 4.11) se aprecia que, en general, existe una mayor cantidad de comunas preseleccionadas con microempresas (número de trabajadores por empresas menor a 9), con una mayor concentración en las macrozonas centro y sur. Esto da a entender que el atributo microempresas es el filtro de selección más débil de los 3, lo cual se aprecia al compararlo con la figura 4.12. Además, es interesante ver que existen comunas con un índice menor a 1, es decir, que existen menos trabajadores que empresas, de lo que se infiere que en esta comuna existe una inmigración de trabajadores. Por lo tanto, este es un atributo que no representa uno de los objetivos del trabajo, que es el de seleccionar comunidades con mayor cantidad de micro-empresas, es decir, localidades con mayor vocación productiva local.

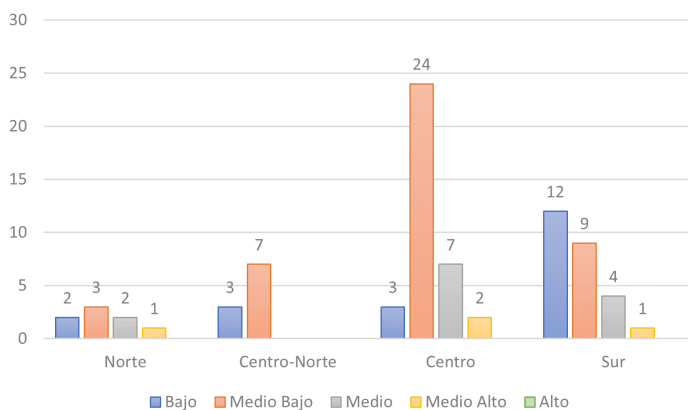


Figura 4.9: Distribución de comunas preseleccionadas por macrozona según IDC.

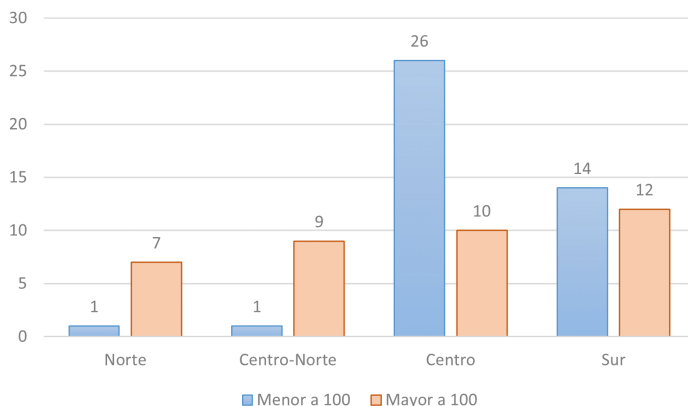


Figura 4.10: Distribución de comunas preseleccionadas por macrozona según número de habitantes sin energía.

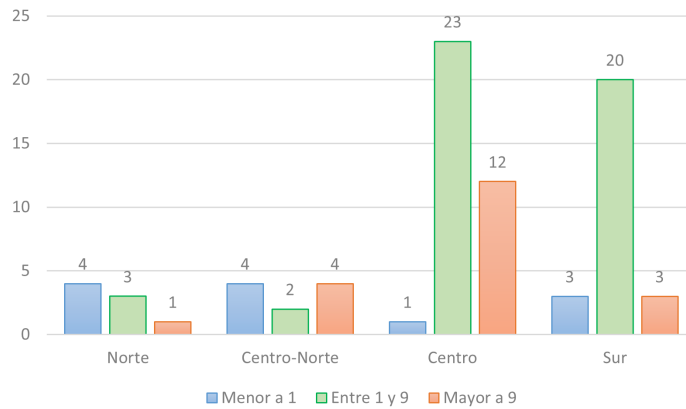


Figura 4.11: Distribución de comunas preseleccionadas por macrozona según número de trabajadores por empresa.

4.2.2. Selección de comunidades

Selección de comunas

En la figura 4.12 se observa la concentración de comunas seleccionadas por macrozona, con un total de 9 comunas. De aquí se desprende que la macrozona sur es la que posee mayor cantidad de comunas seleccionadas con potencial a contener 'enclaves estratégicos'. Por el contrario, la menor cantidad de comunas seleccionadas se encuentra en las macrozonas centro-norte y centro.

En la figura 4.13 se observa la distribución de habitantes sin cobertura eléctrica de las comunas seleccionadas por macrozona, de la cual se aprecia que, al contrario de la preselección de comunas, la distribución de población sin electricidad sigue la misma tendencia que la concentración de comunas seleccionadas, es decir, macrozona sur es la que posee mayor cantidad habitantes sin energía y, por el contrario, la menor cantidad de habitantes sin energía se encuentran en las macrozonas centro-norte y centro.

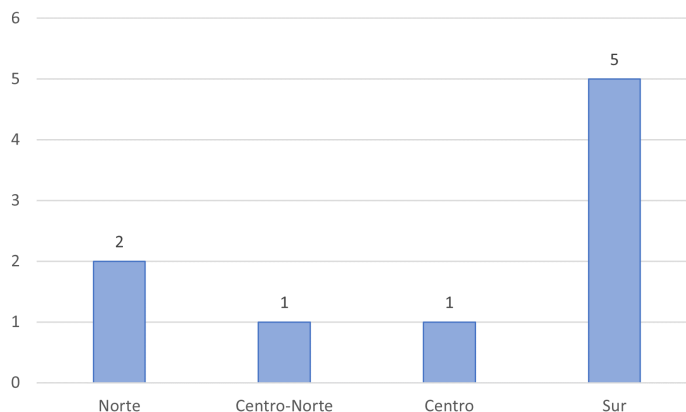


Figura 4.12: Distribución de comunas seleccionadas por macrozona.

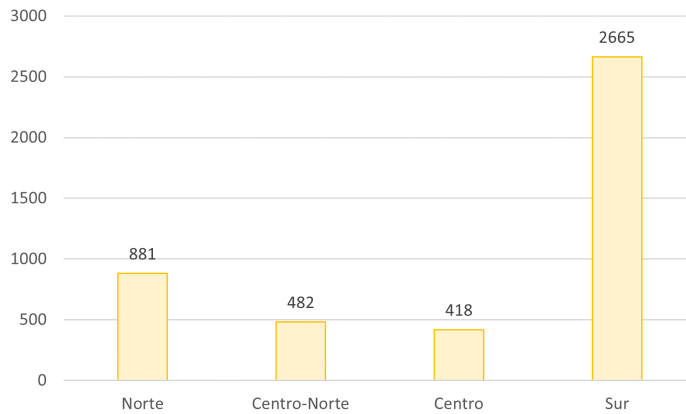


Figura 4.13: Cantidad de habitantes sin electricidad de comunas seleccionadas por macrozona.

Selección de localidades

En la figura 4.14 se muestra la distribución de localidades/entidades por macrozona, donde las macrozonas norte y sur concentran la mayor cantidad de localidades, mientras que las zonas centro-norte y centro serían las que tienen menor cantidad de localidades.

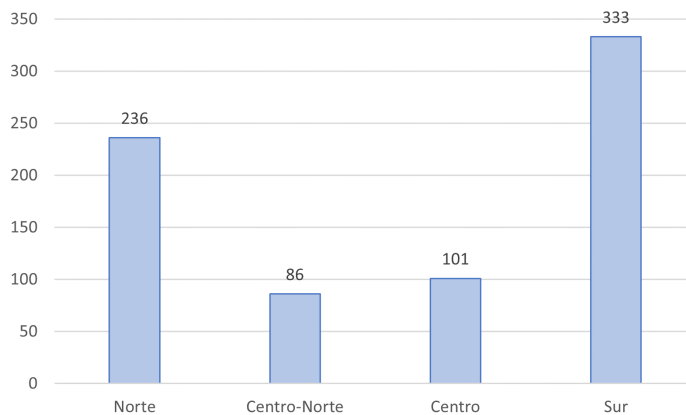


Figura 4.14: Distribución de localidades por macrozona.

En la figura 4.15 se muestra la distribución de localidades según la categoría de esta, donde se observa que, en general, existe una menor cantidad de localidades que son aldea, asentamiento pesquero, caserío o comunidad indígena (119 en total). Este tipo de localidades se encuentran en mayor concentración en las macrozonas norte y sur, lo cual se debe a la alta presencia de comunidades indígenas en la zona norte y sur del país. Al contrario, la macrozona centro contiene una cantidad ínfima de estas.

En la figura 4.16 se aprecia algo parecido a la figura anterior, ya que, en general, existe una menor cantidad de localidades con una población mayor a 40 habitantes, donde en la macrozona sur se encuentra la mayor concentración de estas localidades. Por el contrario, en las macrozonas norte y centro-norte se encuentra una menor concentración de localidades

con una población mayor a 40 habitantes, lo cual se debe directamente a que pertenecen a comunas con baja densidad poblacional.

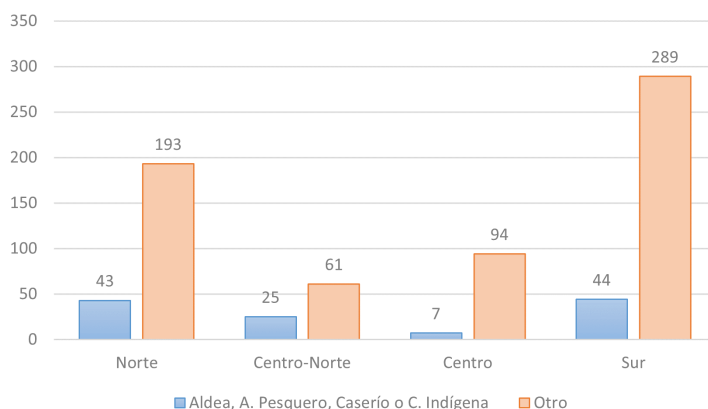


Figura 4.15: Distribución de localidades por macrozona según categoría.

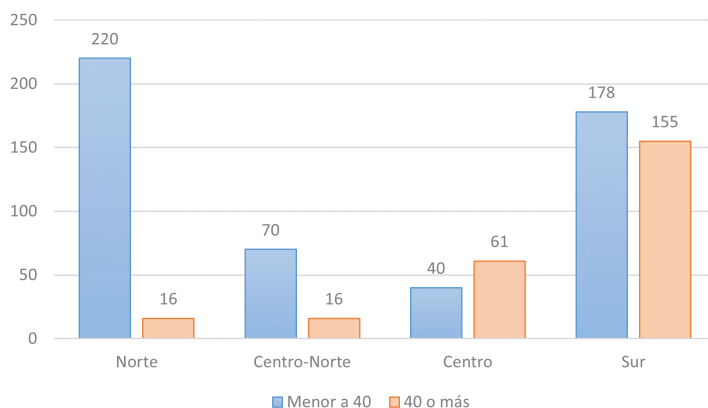


Figura 4.16: Distribución de localidades por macrozona según cantidad de habitantes.

En la figura 4.17 se muestra la distribución de localidades preseleccionadas por macrozona antes de aplicar el filtro de distancia. De esta se desprende que la mayor cantidad de localidades preseleccionadas se encuentra en la macrozona sur, manteniendo esta tendencia. Al compararla con los figuras 4.15 y 4.16, se deduce que el filtro de categoría de localidades es más fuerte en las macrozonas centro y sur, mientras que el filtro de cantidad de habitantes es más estricto en las macrozonas norte y centro-norte.

En la figura 4.18 se muestra la distribución de localidades preseleccionadas por macrozona según criterio de distancia a la red, donde se aprecia que en las macrozonas norte y sur se encuentran la mayor cantidad de localidades preseleccionadas alejadas más de 9 [km] de la red eléctrica, lo cual se debe principalmente a que, en el país, las zonas extremas tienen una extensión menor de sus redes de distribución en comparación con las zonas céntricas.

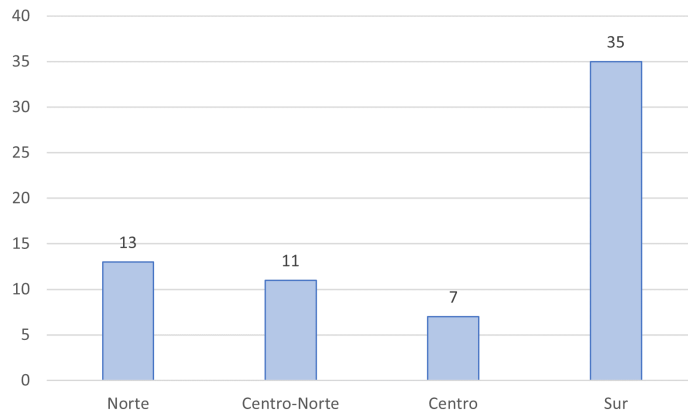


Figura 4.17: Distribución de localidades preseleccionadas por macrozona.

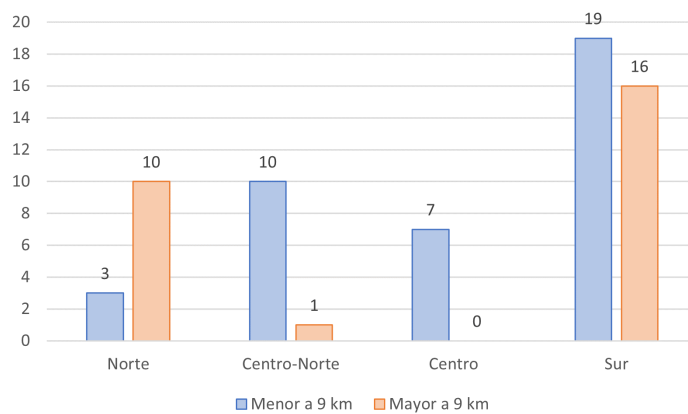


Figura 4.18: Distribución de localidades preseleccionadas por macrozona según distancia a red de distribución.

En la figura 4.19 se muestra la distribución de localidades seleccionadas por macrozona, donde se observa lo mismo al gráfico anterior, ya que es su resultado directo al ser el último filtro de selección. Es decir, se observa que las localidades seleccionadas se concentran en las macrozonas norte y sur del país, mientras que hay solo 1 localidad en la macrozona centro-norte.

Finalmente, en la figura 4.20 se muestra la cantidad de habitantes de las localidades seleccionadas por macrozona, la cual presenta resultados semejantes al de la figura 4.13, donde las macrozonas norte y sur fueron las más próximas, logrando localizar alrededor del 93% de la población sin energía de este par de macrozonas. Por lo tanto, se puede deducir que el método de selección aplicado tiene una gran parte de éxito.

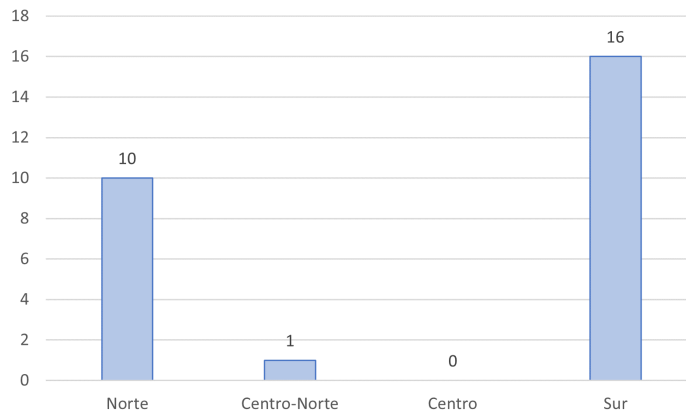


Figura 4.19: Distribución de localidades seleccionadas por macrozona.

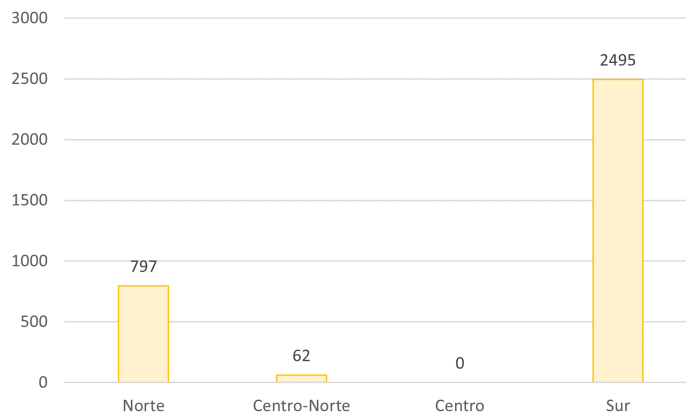


Figura 4.20: Cantidad de habitantes de localidades seleccionadas por macrozona.

4.2.3. Comunidades descartadas

Las comunidades descartadas se encuentran principalmente en las comunas Camarones (macrozona norte), Freirina (macrozona centro-norte) y San Pedro (macrozona centro), conteniendo una gran cantidad de habitantes (ver tabla 4.3), donde parte de ellos podrían ser los faltantes para completar la cantidad de habitantes sin energía estimados, que se observan al comparar las figuras 4.13 y 4.20.

En la tabla 4.4, se aprecia que las localidades descartadas de la comuna de Camarones son las que registran un menor número de habitantes, con un promedio de 25.60 habitantes por localidad, inferior al filtro de selección 40 habitantes. Al contrario, las comunas Freirina y San Pedro, tienen promedios de 61.28 y 100.72 habitantes por localidad, respectivamente, con *peaks* sobre de 550 habitantes por localidad, muy por encima del filtro de selección. Como se dijo anteriormente, esto se debe a que la densidad poblacional es mayor en las zonas céntricas del país.

De la tabla 4.5, se observa que en las localidades descartadas existe un potencial solar más

que suficiente para el desarrollo de micro-redes. Además, el promedio de potencial solar de las localidades descartadas de las comunas de Camarones y Freirina es muy cercano a los de las comunas seleccionadas, que se observan en la tabla 4.8.

En la tabla 4.6, se aprecia que el promedio de distancia a la red eléctrica de las localidades descartadas de la comuna de Camarones es de 20.8715 [km], por encima del filtro de selección de 9 [km]. Al contrario, la comuna de San Pedro presenta un promedio de 0.3741 [km], con un máximo de 1.3555 [km], muy por debajo del filtro de selección, lo cual dió como resultado que ninguna localidad de la macrozona centro haya sido seleccionada.

En la tabla E.1 del anexo E, se puede observar que existe un total de 20 localidades descartadas que cumplen con los 2 primeros filtros de selección (categoría y número de habitantes), además de que existe *data* completa del potencial energético, pero que no cumplen con el filtro de distancia a la red eléctrica de 9 [km]. Hay 16 localidades que presentan una distancia a la red eléctrica menor a 1 [km], lo cual es una distancia corta, y donde la mayoría tiene una gran cantidad de habitantes. Sin embargo, hay algunas localidades con distancias a la red considerables, con una cantidad de habitantes no tan alto, lo cual da a entender que saldría mejor hacer una micro-red que extender la red para abastecer de energía. Por lo tanto, este filtro podría mejorarse, haciendo una comparación entre el costo de extensión de red eléctrica con el costo de inversión inicial del proyecto de micro-red, lo cual podría generar que se seleccionen algunas de estas localidades descartadas y así definir de mejor forma los enclaves estratégicos.

4.2.4. Priorización de localidades seleccionadas

La inversión inicial por habitante (Inv_0/hab) obtenida (ver figura 4.6) de las localidades seleccionadas presentan una gran variabilidad. En la tabla 4.8 se observan los costos de inversión inicial por habitante promedio por comunas de las localidades seleccionadas, de la cual se aprecia que la Inv_0/hab promedio son menores en las comunas Camarones y Putre, al contrario de la Inv_0/hab promedio de la comuna Alto Biobío. Esto se debe, principalmente, a que las comunas de la macrozona norte del país presenta valores superiores de potencial eólico solar, lo cual hace que, para una demanda energética determinada, se requiera de menor capacidad (equipos de generación), disminuyendo los costos de inversión.

Sin embargo, es importante mencionar que el costo de inversión inicial por habitante calculado es un aproximado al real, ya que solo se están considerando tecnologías solar/eólica con almacenamiento, valores promedios del potencial energético y demanda energética de cada localidad. La manera correcta de calcular estos costos es hacer un dimensionamiento del proyecto de micro-red usando algún *software*, como *Homer Pro*, el cual necesita como *input* perfiles de radiación solar, perfiles de viento, perfiles de demanda eléctrica y, además, especificaciones técnicas y económicas de equipos de generación solar, eólico, grupos de electrógenos y sistemas de almacenamiento.

Comuna	Macrozona	Inv_0/hab promedio [MCLP/hab.]	Energía eólica promedio [kWh/m ² /día]	Energía solar promedio [kWh/m ² /día]
Camarones	Norte	0,2442	0,0054	1,3397
Putre	Norte	0,2805	0,0049	1,3495
Freirina	Centro-norte	0,3460	0,0031	1,0060
Alto Biobío	Sur	0,4158	0,0049	0,9712

Tabla 4.8: Promedios de costos de inversión por habitante, potencial eólico y solar por comuna de localidades seleccionadas.

En la figura 4.21 se observa la gráfica de las comunidades seleccionadas con sus respectivos indicadores IDC e Inv_0 , cuya priorización se encuentra en la tabla 4.7 de la sección de resultados. De esta se aprecia que, en general, las localidades de las comunas Alto Biobío y Camarones tienen prioridad sobre las demás, ya que son las localidades asociadas a comunas con menor índice de desarrollo comunal (IDC).

Sin embargo, también se logra ver que existen localidades de la comuna de Alto Biobío al final de la priorización, teniendo un IDC menor. Esto se debe a que, a la hora de hacer los Frente de Pareto, estas localidades son las que quedaron en el último conjunto de comunidades. Esto se evidencia en las 4 primeras localidades, donde la localidad Palmucho queda en la cuarta posición, presentando un IDC menor que la segunda y tercera localidad, dado que no pertenece al primer conjunto de comunidades (primer Frente de Pareto, ver figura 4.21), en la cual se encuentra las localidades El Avellano, Codpa y Complejo Aduanero Chungará.

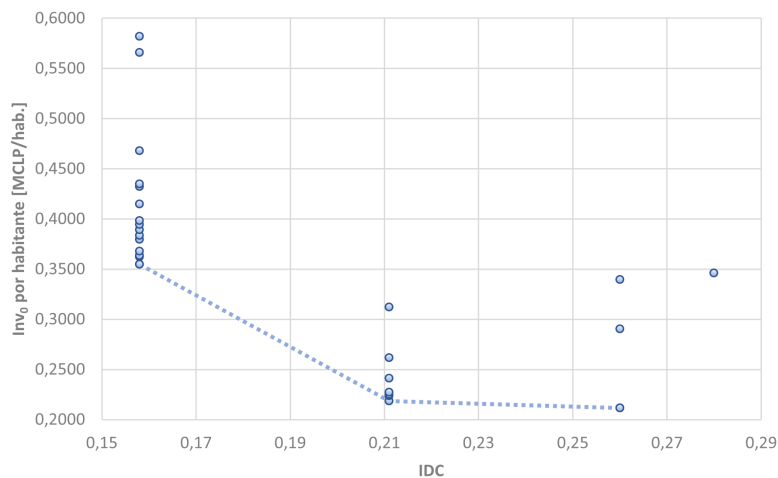


Figura 4.21: Indicadores IDC e Inv_0 por comunidad.

La tabla 4.7 además presenta una priorización alternativa respecto al indicador número de empresas (N°Empresas), cuyo criterio es que tienen prioridad las localidades con mayor número de empresas, es decir, las que tienen mayor vocación productiva. Esta priorización es diferente al del anterior, donde se observa que las localidades de las comunas Camarones, Freirina y Putre tienen prioridad sobre las localidades de la comuna Alto Biobío, ya que son las localidades asociadas a comunas con mayor número de empresas. Además, también

se puede apreciar como actúa el Frente de Pareto a la hora de priorizar, donde la localidad Guatanave queda en la tercera posición, teniendo una mayor presencia de empresas, dado que no pertenece al primer Frente de Pareto (ver figura 4.22), en la cual se encuentra las localidades Codpa y Complejo Aduanero Chungará.

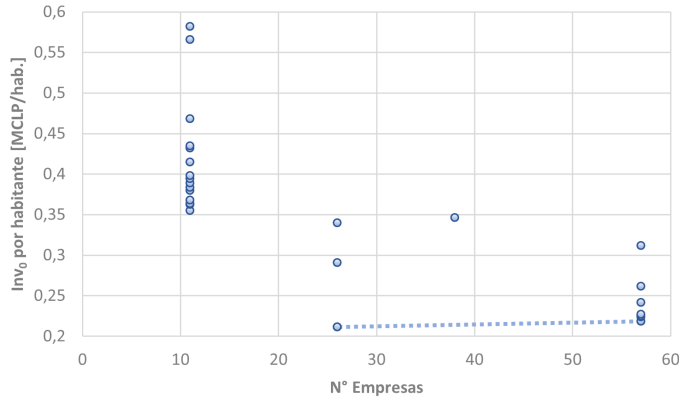


Figura 4.22: Indicadores N°Empresas e Inv_0 por comunidad.

Es interesante ver que, dependiendo los indicadores y criterios escogidos, la priorización puede variar bastante, como también en que momento se hace la priorización. La priorización se puede hacer en diferentes momentos de un plan de trabajo de desarrollo de micro-red, donde lo más lógico sería hacerla una vez definido los costos de la operación y mantenimiento (O&M) de los proyectos de micro-red, donde ahí sería más pertinente usar el VAC (valor actual de costos) como indicador.

Sin embargo, también resulta importante hacer una priorización de comunidades aisladas antes de un plan de trabajo de desarrollo de micro-red, como la de este memoria, ya que, por ejemplo, podría ser que existan recortes en los recursos o inconvenientes antes de iniciar un plan de trabajo, donde se tendría que apartar comunidades seleccionadas. En este caso, esta priorización podría servir para seleccionar el nuevo grupo de comunidades y así iniciar un nuevo plan de trabajo de desarrollo de micro-redes.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones generales

A modo de conclusión, se logra cumplir el objetivo general de esta memoria, donde se propone y desarrolla una metodología para la definición y priorización de enclaves estratégicos para el desarrollo de micro-redes, consiguiendo una cartografía final de las localidades seleccionadas.

Además, en este trabajo se analizaron diversos indicadores, con los cuales se formaron filtros para la selección y priorización de comunidades a lo largo del territorio nacional chileno, en especial, desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región del Biobío, donde cada uno de los filtros se analizó respecto a la cantidad de comunas o localidades seleccionadas por macrozona del país.

Con respecto al análisis de los atributos de la selección de comunas, el atributo 'Índice de Desarrollo Comunal (IDC)' ha sido el más determinante a la hora de filtrar comunas, seguido del atributo 'número de habitantes sin energía eléctrica', con los cuales, al aplicar los filtros respectivos, redujeron el universo de 80 comunas a 10 comunas. Sin embargo, el atributo 'número de trabajadores por empresa', fue el más débil para la filtración de comunas, donde al aplicarlo junto a los otros 2 filtros, redujo de 80 comunas a 9 comunas, es decir, descartó 1 comuna más. Además, este indicador no ha representado del todo bien su objetivo, por lo cual se propone como trabajo a futuro.

De los resultados obtenidos de la selección de comunas, se tiene que 9 comunas fueron seleccionadas, en su mayoría en las macrozonas norte y sur del país, lo que coincide con la lógica de que las zonas extremas del país son las más desfavorecidas en cuanto a la conectividad eléctrica.

En cuanto al análisis de los atributos de selección de localidades, de las comunas ya seleccionadas, todos ellos se consideran determinantes, donde los atributos 'categoría' y 'distancia a la red' son más fuertes en las macrozonas norte y sur. En cuanto al atributo 'cantidad de habitantes' es muy fuerte en la macrozona sur.

De los resultados obtenidos de la selección de localidades, se tiene que 27 localidades fueron

seleccionadas, en su mayoría en las macrozonas norte y sur del país. Además, se reconoce el 93 % de la población sin energía de estas macrozonas, con lo cual se puede verificar el buen desempeño del trabajo realizado.

Del análisis de las comunidades descartadas, se infiere que algunas de estas localidades podrían ser seleccionadas si el filtro de selección de distancia a la red se mejora al cambiarlo por uno que compare el costo de extensión de red con el costo de inversión inicial del proyecto de micro-red.

Finalmente, de los resultados obtenidos de la priorización de comunidades con Óptimo de Pareto, al escoger el IDC como indicador de priorización, localidades de las comunas Alto Biobío y Camarones tienen prioridad sobre las demás, ya que son las localidades asociadas a comunas con un menor IDC. Sin embargo, al escoger el número de empresas como indicador de priorización, el resultado es diferente en gran parte. Esto da cuenta que los resultados de una priorización van a variar dependiendo del objetivo que tenga el tomador de decisiones. Además, se logra apreciar que, independiente del índice de priorización escogido, el Frente de Pareto permite considerar, en parte, a las localidades con mayores costos de inversión por habitante, es decir, localidades con menor potencial energético del país.

5.2. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone lo siguiente:

- Buscar y formar una nueva capa de información respecto al potencial económico de cada comunidad, definiendo un atributo/índice que represente de gran manera la vocación productiva local de esta, para así beneficiar a localidades con un mayor número de micro-empresas.
- Buscar e incluir una capa de información de la dimensión medioambiental para el territorio nacional, con el fin de que las comunidades seleccionadas y priorizadas tengan un proyecto de electrificación que sea sustentable con el medioambiente.
- Realizar dimensionamiento óptimo de micro-redes para calcular los costos de inversión inicial reales de los proyectos y para incluir todas las tecnologías de generación y de almacenamiento que necesitan las micro-redes.
- Mejorar el filtro de distancia a la red, donde se podría usar un costo de extensión de red y compararlo con el costo de inversión inicial del proyecto de micro-red.
- Incluir la optimización multiobjetivo Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para la priorización de comunidades y realizar una comparación con los resultados obtenidos usando Óptimo de Pareto.
- Buscar una capa de información adicional de los alimentadores de distribución de las regiones faltantes, para así abarcar todo el territorio nacional, como también buscar información de otros países de Latinoamérica para aplicar la metodología propuesta.

Bibliografía

- [1] F. Palma R., R. Mebus P., Pontificia Universidad Católica de Chile, “Electrificación Rural en Chile: Informe Final,” Santiago, 1998
- [2] Ministerio de Energía, “Mapa de Vulnerabilidad Energética Ruta de la Luz,” Santiago, Chile, 2019. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3m1vp5r>
- [3] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, “Zonas aisladas y fronteras interiores Accesibilidad en Regiones,” Santiago, Chile, 2015. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/38XL4jt>
- [4] F. Covarrubias, I. Irrázaval, R. Galáz, “Desafíos de la Electrificación Rural en Chile,” Programa de Asistencia a la Gestión del Sector de la Energía, 2005. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3N317vh>
- [5] Ministerio de Desarrollo Social, “Metodología de Formulación y Evaluación de Proyectos de Electrificación Rural,” Santiago, Chile, 2015. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3a6QSqY>
- [6] Centro de Energía FCFM, “Micro-redes para localidades aisladas,” Santiago, Chile, 2013
- [7] C. Marnay et al., “Microgrid Evolution Roadmap,” 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015, pp. 139-144
- [8] “IEEE Draft Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems,” in IEEE P1547.4/D11, March 2011 , vol., no., pp.1-55, Mar. 2011
- [9] General Electric Company, ““Microgrid Control System - Legacy,” *Microgrid Overview*. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/2TQ6NCs>
- [10] D. Schnitzer, D. Lounsbury, J. Carvallo, R. Deshmukh, Jay Apt and D. Kammen, “Microgrids for Rural Electrification: A critical review of best practices based on seven case studies,” United Nations Foundation, Feb. 2014
- [11] K. Ubilla, G. A. Jimenez-Estevez, R. Hernandez, L. Reyes-Chamorro, C. Hernandez Irigoyen, B. Severino, and R. Palma-Behnke, “Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1310–1318, Oct. 2014

- [12] D. Jiménez, M. Vives, G. Jiménez and P. Mendoza, “Development of a Methodology for Planning and Design of Microgrids for Rural Electrification,” Conference Paper, Oct. 2017
- [13] A. Mendoza, C. Solano, D. Palencia, D. Garcia, “Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos,” *Revista chilena de ingeniería*, vol. 27, no. 3, pp. 348-360, 2019
- [14] S. Padilla, “Vilfredo Pareto,” *Economipedia*, Dec. 2019. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3fkLkcg>
- [15] J. Aranda, J. Orjuela, “Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura,” *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, vol. 20, no. 1, pp. 37-63, Mar. 2015
- [16] National Geographic, “GIS (Geographic Information System).” [Online]. Disponible: <https://bit.ly/2VtpLzi>
- [17] P. Garcia, “¿Que es un SIG, GIS o Sistema de Información Geográfica?,” *Geoinnova*, Feb. 2021. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/2VoRq4f>
- [18] HOMER Energy, “HOMER Pro.” [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3AhJmBJ>
- [19] J. Godoy, R. Schierloh and J. Vega, “Evaluación económica de microrredes eléctricas con generación renovable,” *Technical Article*, Ago. 2019. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3ajAiUY>
- [20] Ministerio de Energía de Chile, “Financiamiento Estatal en Chile Programa Electrificación Rural (PER),” *Workshop on Energy Storage for Sustainable Development*, Rio de Janeiro, 2015. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3NHI4q7>
- [21] M. Bueno-López and S. Garzón, “Electrification in Non-Interconnected Areas,” *IEEE Technology and Society Magazine*, pp. 73-79, Dic. 2017
- [22] K. Ubilla, G. A. Jimenez-Estevéz, R. Hernadez, L. Reyes-Chamorro, C. Hernandez Irigoyen, B. Severino, and R. Palma-Behnke, “Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1310–1318, Oct. 2014
- [23] L. Hoyos, B. Ruiz and P. Mendoza, “A multicriteria methodology for prioritisation of social projects and community participation: Nariño study case,” *International Journal of Sustainable Energy*, Feb. 2021
- [24] C. Paredes and L. Reyes, “Prioritization of isolated communities for the development of renewable-energy projects in wide geographical areas,” *IEEE PES T&D LA*, 2020
- [25] T. Jamal, T. Urmee, GM. Shafiullah and F. Shahnia, “Using Experts’ Opinions and Multi-Criteria Decision Analysis to Determine the Weighing of Criteria Employed in Planning Remote Area Microgrids,” *Murdoch University, Australia*, Oct. 2018

- [26] D. Jiménez, M. Vives, G. Jiménez and P. Mendoza, “Development of a Methodology for Planning and Design of Microgrids for Rural Electrification,” Conference Paper, Oct. 2017
- [27] Explorador Solar, “Recursos SIG,” Ministerio de Energía. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3o3S7Mf>
- [28] Explorador Eólico, “Recursos SIG,” Ministerio de Energía. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3xymD3S>
- [29] Departamento de Energía EEUU, “Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad,” Sep. 2007. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/31UXjQJ>
- [30] JinKO Solar, Cheetah HC 72M 390-410 Watt. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3wEqz1f>
- [31] Danish Wind Industry Association, “El efecto del parque” [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3KkXhM0>
- [32] M. Blackwood, “Maximum Efficiency of a Wind Turbine,” Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two: Vol. 6: Iss. 2, Article 2. 2016. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3a98a6M>
- [33] Instituto Nacional de Estadísticas, “Censo de Población y Vivienda: Censo 2017,” [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3MCWLeg>
- [34] In-Data, “Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018,” Ministerio de Energía, Dic, 2019. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3JGTZD9>
- [35] J. Hernández, “Índice de Desarrollo Comunal,” Universidad Autónoma de Chile, Sep. 2020. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3M0VD2J>
- [36] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, “SIIT Estadísticas Territoriales: Número de empresas y trabajadores por Rubro,” [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3CsDt6T>
- [37] P. Ramírez, P. Mendoza, F. Valencia, G. León, L. Cornejo, M. Montedonico y G. Jiménez, “Sustainable development through the use of solar energy for productive processes: The Ayllu Solar Project,” Universidad de Chile, LIMZA, Universidad de Tarapacá, Chile, 2017.
- [38] Comisión Nacional de Energía, “Informe de Costos de Tecnologías de Generación,” Mar. 2020. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3z10L46>
- [39] INE, “Memoria del Censo 2017,” [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3CpCdR0>
- [40] Subsecretaría de Desarrollo Region y Administrativo, “Informe Listado de Comunas Susceptibles de ser Propuestas como Zonas Rezagadas en Materia Social 2021,” Santiago, Chile, Abr. 2021. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/38SMpIu>
- [41] Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, “Antecedentes para la revisión de los criterios de clasificación del Estatuto Pyme,” Abr. 2014 [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3vRyHyG>

[42] Southwest Windpower, Skystream 3.7. [Online]. Disponible: <https://bit.ly/3DqTrz3>

Anexos

Anexo A

Base acumulativa de datos para comunas susceptibles a ser zona rezagada 2021

Tabla A.1: Comunas susceptibles a ser zona rezagada 2021.

DATOS ACUMULADOS PARA COMUNAS SUSCEPTIBLES A SER ZONA REZAGADA 2021											
ID	Región	Comuna	Habitantes	Economía	IDC	Rango	Cobertura	Habitantes Sin Energía	N° Empresas	N° Trabajadores	Trabajadores por Empresa
1	Región Metropolitana de Santiago	Albú	6444	0,0551	0,2945	Medio bajo	99,12%	57	94	1113	11,84
2	Región del Biobío	Alto Biobío	5923	0,0369	0,1584	Bajo	68,58%	1861	11	3	0,27
3	Región de Atacama	Alto del Carmen	5299	0,0497	0,2647	Bajo	99,37%	33	166	163	0,98
4	Región de Los Lagos	Aucud	38991	0,1478	0,4175	Medio	98,61%	542	753	1191	1,58
5	Región de Coquimbo	Andacollo	11044	0,0531	0,3016	Medio bajo	97,49%	277	13	217	16,69
6	Región de Antofagasta	Antofagasta	361873	0,3383	0,618	Medio alto	99,91%	326	115	1222	10,63
7	Región del Biobío	Autuco	4073	0,0477	0,271	Bajo	98,09%	78	27	17	0,63
8	Región de Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	Aysén	23959	0,1904	0,4854	Medio	98,47%	367	259	952	3,68
9	Región de Ñuble	Bulnes	21493	0,0914	0,3592	Medio bajo	99,89%	24	432	2008	4,65
10	Región de Magallanes y la Antártica Chilena	Cabo de Hornos	2063	0,0766	0,3606	Medio bajo	96,76%	67	27	36	1,33
11	Región de Los Lagos	Calbuco	33985	0,083	0,3244	Medio bajo	99,55%	153	223	908	4,07
12	Región Metropolitana de Santiago	Calera de Tango	25392	0,1436	0,4415	Medio	99,71%	74	181	2900	16,02
13	Región de Arica y Parinacota	Camarones	1255	0,0556	0,2108	Bajo	99,96%	503	57	9	0,16
14	Región de Valparaíso	Cartagena	22738	0,0817	0,3568	Medio bajo	99,79%	48	74	347	4,69
15	Región de Los Lagos	Chaitén	5071	0,1127	0,3392	Medio bajo	86,43%	688	65	36	0,55
16	Región de Atacama	Chañaral	12219	0,0977	0,3681	Medio bajo	96,59%	417	22	41	1,86
17	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Chépica	15037	0,0608	0,3132	Medio bajo	98,58%	214	612	3820	6,24
18	Región de Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	Chile Chico	4865	0,1216	0,397	Medio	95,54%	217	69	421	6,10
19	Región de Ñuble	Chillán Viejo	30907	0,1023	0,378	Medio bajo	99,92%	25	108	441	4,08
20	Región de La Araucanía	Cholchol	11611	0,0288	0,1851	Bajo	98,06%	225	33	26	0,79
21	Región de Los Lagos	Chonchi	14858	0,1049	0,3532	Medio bajo	95,33%	694	170	4129	24,29
22	Región de Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	Cisnes	6517	0,2004	0,4766	Medio	94,96%	328	116	332	2,86
23	Región de Los Lagos	Cochamó	4023	0,0524	0,2306	Bajo	83,79%	652	89	35	0,39
24	Región de Ñuble	Colhuaco	26881	0,0578	0,2963	Medio bajo	99,12%	237	836	10730	12,83
25	Región del Maule	Colbún	20765	0,0559	0,2926	Medio bajo	99,02%	203	441	1290	2,93
26	Región Metropolitana de Santiago	Colina	146207	0,2007	0,5182	Medio alto	99,95%	73	353	5288	14,98
27	Región de Los Ríos	Corral	5302	0,0745	0,2848	Bajo	94,26%	304	25	1	0,04
28	Región de La Araucanía	Cunco	17526	0,0441	0,2612	Bajo	97,37%	461	294	322	1,10
29	Región Metropolitana de Santiago	Curacaví	32579	0,0943	0,3827	Medio bajo	99,71%	94	376	4789	12,74
30	Región de La Araucanía	Curarrehue	7489	0,0403	0,2207	Bajo	96,98%	226	33	100	3,03
31	Región del Maule	Curepto	9448	0,0324	0,2407	Bajo	99,01%	94	145	877	6,05
32	Región de Ñuble	El Carmen	12044	0,0524	0,2467	Bajo	99,45%	66	468	1532	3,27
33	Región Metropolitana de Santiago	El Monte	35923	0,0854	0,3522	Medio bajo	99,89%	40	245	1422	5,80
34	Región del Biobío	Florida	10624	0,0529	0,2509	Bajo	96,37%	386	115	522	4,54
35	Región de La Araucanía	Freire	24606	0,0535	0,2511	Bajo	98,22%	438	369	2070	5,61
36	Región de Atacama	Freirina	7041	0,0568	0,2799	Bajo	93,16%	482	38	35	0,92
37	Región de Los Lagos	Fresia	12261	0,0613	0,2894	Medio bajo	96,86%	385	365	485	1,33
38	Región de Los Lagos	Futaletufú	2623	0,1259	0,4201	Medio	91,08%	234	54	28	0,52
39	Región de Arica y Parinacota	General Lagos	11996	0,0398	0,1928	Bajo	98,46%	185	114	892	7,82
40	Región de Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	Guaitecas	684	0,022	0,1443	Bajo	21,43%	537	4	0	0,00
41	Región de Los Lagos	Hualaihué	1843	0,1204	0,4057	Medio	99,44%	10	15	56	3,73
42	Región del Maule	Hualañé	8944	0,0708	0,2816	Bajo	96,37%	325	68	80	1,18
43	Región del Biobío	Hualqui	9657	0,0625	0,3058	Medio bajo	99,53%	45	341	1623	4,76
44	Región de Coquimbo	Illapel	24333	0,1265	0,4035	Medio	98,65%	328	74	422	5,70
45	Región Metropolitana de Santiago	Isla de Maipo	30848	0,0839	0,3593	Medio bajo	98,70%	401	349	345	0,99
46	Región Metropolitana de Santiago	La Higuera	36219	0,0907	0,3634	Medio bajo	99,80%	72	303	4856	16,03
47	Región de Coquimbo	La Higuera	4241	0,0506	0,251	Bajo	91,95%	341	17	215	12,65
48	Región de Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	Lago Verde	852	0,0787	0,3106	Medio bajo	82,91%	146	24	155	6,46
49	Región del Biobío	Laja	22389	0,0831	0,3488	Medio bajo	99,58%	94	48	98	2,04
50	Región de Los Ríos	Lanco	16752	0,095	0,3495	Medio bajo	98,68%	221	205	2487	12,13

DATOS ACUMULADOS PARA COMUNAS SUSCEPTIBLES A SER ZONA REZAGADA 2021

ID	Región	Comuna	Habitantes	Economía	IDC	Rango	Cobertura	Habitantes Sin Energía	N° Empresas	N° Trabajadores	Trabajadores por Empresa
51	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Las Cabras	24640	0,0753	0,3359	Medio bajo	99,99%	2	537	11681	21,75
52	Región del Maule	Licantén	6653	0,0728	0,3205	Medio bajo	99,42%	39	80	79	0,99
53	Región de Valparaíso	Limache	46121	0,1564	0,4554	Medio	99,54%	212	422	2907	6,89
54	Región de La Araucanía	Loncoche	23612	0,0709	0,3187	Medio bajo	99,40%	122	261	447	1,71
55	Región del Maule	Longaví	30534	0,0784	0,3228	Medio bajo	99,60%	142	1361	3865	2,84
56	Región de La Araucanía	Lonquimay	10251	0,0425	0,2053	Bajo	97,09%	298	81	120	1,48
57	Región del Biobío	Los Angeles	202331	0,1822	0,4698	Medio	99,85%	303	1876	24390	13,00
58	Región de Los Ríos	Los Lagos	19634	0,0874	0,3168	Medio bajo	98,80%	236	270	451	1,67
59	Región de Los Lagos	Los Muermos	17068	0,066	0,2894	Medio bajo	97,55%	418	703	603	0,86
60	Región de Coquimbo	Los Vilos	21382	0,0806	0,3477	Medio bajo	98,57%	306	93	102	1,10
61	Región de Los Ríos	Máfil	7095	0,0985	0,3455	Medio bajo	98,18%	129	156	637	4,08
62	Región de Antofagasta	María Elena	6457	0,0903	0,3745	Medio bajo	99,51%	32	1	0	0,00
63	Región Metropolitana de Santiago	Maria Pinto	13590	0,0597	0,3076	Medio bajo	99,70%	41	289	1441	4,99
64	Región de Los Ríos	Maripíñ	21278	0,085	0,3341	Medio bajo	97,93%	440	214	1071	5,00
65	Región de Los Lagos	Maulín	14216	0,0517	0,2745	Bajo	96,13%	550	200	340	1,70
66	Región de La Araucanía	Melipenco	6138	0,0261	0,2127	Bajo	99,19%	50	29	24	0,83
67	Región Metropolitana de Santiago	Melipilla	123627	0,1199	0,4225	Medio	99,82%	223	1693	25236	14,91
68	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Mostazal	25343	0,1176	0,3847	Medio	100,00%	0	274	9821	35,84
69	Región del Biobío	Mulchén	29627	0,1176	0,3789	Medio bajo	99,13%	258	420	2474	5,89
70	Región del Biobío	Nacimiento	26315	0,1281	0,4133	Medio	97,23%	729	91	2882	31,67
71	Región de Magallanes y la Antártica Chilena	Natales	21477	0,2045	0,5074	Medio alto	98,60%	301	289	1802	6,24
72	Región del Biobío	Negrete	9737	0,0534	0,2848	Bajo	99,62%	37	138	959	6,95
73	Región de Ñuble	Niquén	11152	0,0514	0,2697	Bajo	99,42%	65	569	575	1,01
74	Región de Antofagasta	Ollagüe	321	0,0557	0,2538	Bajo	92,91%	23	0	0	0,00
75	Región Metropolitana de Santiago	Padre Hurtado	63250	0,1419	0,4403	Medio	99,90%	63	104	602	5,79
76	Región de La Araucanía	Padre las Casas	76126	0,0777	0,3152	Medio bajo	99,29%	540	221	987	4,47
77	Región de Los Ríos	Paillico	20188	0,1011	0,3628	Medio bajo	98,82%	238	381	1208	3,17
78	Región Metropolitana de Santiago	Paine	72759	0,1154	0,4185	Medio	99,87%	95	964	15234	15,80
79	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Palmilla	12482	0,0716	0,3306	Medio bajo	99,95%	6	564	3569	6,33
80	Región de Los Ríos	Panguipulli	34539	0,1033	0,3372	Medio bajo	96,27%	1288	245	713	2,91
81	Región del Maule	Parral	41637	0,1442	0,4272	Medio	99,72%	117	1369	3552	2,59
82	Región del Maule	Pelarco	8422	0,0741	0,3164	Medio bajo	99,65%	29	323	577	1,79
83	Región de Ñuble	Pemuco	8448	0,0487	0,2612	Bajo	99,86%	12	167	265	1,59
84	Región del Maule	Pencahue	8245	0,0577	0,2747	Bajo	99,14%	71	376	1513	4,02
85	Región de Tarapacá	Pica	9296	0,0774	0,3266	Medio Bajo	99,52%	45	59	43	0,73
86	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Pichidegua	19714	0,0713	0,3235	Medio bajo	100,00%	0	751	4250	5,66
87	Región de Ñuble	Pinto	10827	0,0696	0,2935	Medio bajo	99,97%	3	275	1847	6,72
88	Región de Tarapacá	Pozo Almonte	15711	0,0953	0,3417	Medio Bajo	98,68%	207	35	93	2,66
89	Región de Los Lagos	Puerto Octay	8999	0,0687	0,2922	Medio bajo	95,94%	365	246	2074	8,43
90	Región de Los Lagos	Puqueldón	3921	0,0546	0,2481	Bajo	99,13%	34	29	334	11,52
91	Región de Los Lagos	Purranque	20369	0,1108	0,3879	Medio	97,67%	475	382	1652	4,32
92	Región de Arica y Parinacota	Pute	2765	0,065	0,26	Bajo	86,30%	379	26	10	0,38
93	Región de Los Lagos	Puyehue	11667	0,0816	0,3283	Medio bajo	96,83%	370	323	1876	5,81
94	Región de Los Lagos	Quellón	5385	0,0973	0,3023	Medio bajo	95,17%	260	70	60	0,86
95	Región de Los Lagos	Quellón	27192	0,1146	0,3623	Medio bajo	97,82%	593	238	1398	5,87
96	Región de Los Lagos	Queunchi	8352	0,0698	0,2648	Bajo	96,95%	255	62	476	7,68
97	Región del Biobío	Quilaco	3988	0,0612	0,2847	Bajo	97,30%	108	84	217	2,58
98	Región del Biobío	Quilco	9587	0,0422	0,2506	Bajo	98,57%	137	113	500	4,42
99	Región de Valparaíso	Quilota	90517	0,1944	0,512	Medio alto	100,00%	0	925	6592	7,13
100	Región de Los Lagos	Quinchao	8088	0,0723	0,293	Medio bajo	99,69%	25	32	421	13,16

DATOS ACUMULADOS PARA COMUNAS SUSCEPTIBLES A SER ZONA REZAGADA 2021

ID	Región	Comuna	Habitantes	Economía	IDC	Rango	Cobertura Sin Energía	Habitantes Sin Energía	N° Empresas	N° Trabajadores	Trabajadores por Empresa
101	Región del Maule	Ranco	10484	0,0628	0,3062	Medio bajo	99,29 %	74	348	5266	15,13
102	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Requinoa	27968	0,0888	0,3676	Medio bajo	100,00 %	0	513	14887	29,02
103	Región del Maule	Retiro	19974	0,0821	0,3283	Medio bajo	99,70 %	60	1448	4076	2,81
104	Región del Maule	Río Claro	13906	0,0561	0,2955	Medio bajo	99,75 %	35	357	2553	7,15
105	Región de Coquimbo	Río Hurtado	4278	0,0331	0,2358	Bajo	96,94 %	131	0	0	0,00
106	Región de Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	Río Ibáñez	2666	0,1112	0,3668	Medio bajo	92,22 %	207	88	27	0,31
107	Región de Los Lagos	Río Negro	14085	0,0963	0,3488	Medio bajo	97,81 %	308	395	3127	7,92
108	Región del Maule	Romeral	15187	0,1063	0,3829	Medio bajo	99,74 %	39	659	17010	25,81
109	Región del Maule	Sagrada Familia	18544	0,0659	0,3129	Medio bajo	99,63 %	69	645	9463	14,67
110	Región de Coquimbo	Salamanca	29347	0,0845	0,3487	Medio bajo	98,45 %	455	657	528	0,80
111	Región de Valparaíso	San Antonio	91350	0,1781	0,4778	Medio	99,99 %	9	217	741	3,41
112	Región de Ñuble	San Carlos	53024	0,1168	0,4051	Medio	99,93 %	37	1398	2852	2,04
113	Región del Maule	San Clemente	43269	0,0772	0,3384	Medio bajo	99,14 %	372	1183	7641	6,46
114	Región de Ñuble	San Fabián	4308	0,0462	0,2796	Bajo	98,99 %	44	63	450	7,14
115	Región de Ñuble	San Ignacio	16079	0,0472	0,2599	Bajo	99,71 %	47	436	2035	4,67
116	Región del Maule	San Javier	45547	0,1051	0,379	Medio bajo	99,96 %	18	869	5327	6,13
117	Región Metropolitana de Santiago	San José de Maipo	18189	0,1182	0,3732	Medio bajo	98,29 %	311	48	88	1,83
118	Región de Los Lagos	San Juan de la Costa	7512	0,0222	0,1359	Bajo	84,03 %	1200	74	81	1,09
119	Región de Los Lagos	San Pablo	10030	0,0777	0,3064	Medio bajo	96,02 %	399	278	704	2,53
120	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	9726	0,0572	0,2603	Bajo	95,70 %	418	412	471	1,14
121	Región de Antofagasta	San Pedro de Atacama	10996	0,0941	0,3499	Medio bajo	97,90 %	231	18	1	0,06
122	Región del Biobío	San Rosendo	3412	0,2809	0,5004	Medio alto	99,69 %	11	4	21	5,25
123	Región del Biobío	Santa Bárbara	13773	0,1037	0,3481	Medio bajo	99,10 %	124	251	205	0,82
124	Región del Biobío	Santa Juana	13749	0,0482	0,2798	Bajo	98,74 %	173	37	212	5,73
125	Región de Antofagasta	Sierra Gorda	10186	0,0665	0,3119	Medio bajo	98,38 %	165	0	0	0,00
126	Región de Antofagasta	Taltal	13317	0,1304	0,3906	Medio	93,56 %	858	16	34	2,13
127	Región de Atacama	Tierra Amarilla	14019	0,092	0,3271	Medio bajo	97,53 %	346	95	2407	25,34
128	Región Metropolitana de Santiago	Tiltil	19312	0,1107	0,374	Medio bajo	98,83 %	226	96	2365	24,64
129	Región de Antofagasta	Tocopilla	25186	0,1428	0,4292	Medio	97,47 %	637	11	66	6,00
130	Región del Biobío	Tucapel	14134	0,0982	0,3706	Medio bajo	99,69 %	44	138	474	3,43
131	Región de Valparaíso	Valparaíso	296655	0,2627	0,5598	Medio alto	99,99 %	30	205	1083	5,28
132	Región del Maule	Vichuquén	4322	0,0628	0,2976	Medio bajo	98,56 %	62	43	58	1,35
133	Región de Coquimbo	Vicuña	27771	0,074	0,3429	Medio bajo	99,05 %	264	373	6326	16,96
134	Región de La Araucanía	Vilcún	28151	0,0496	0,2633	Bajo	99,16 %	236	431	1655	3,84
135	Región del Biobío	Yumbel	21198	0,0689	0,3116	Medio bajo	99,51 %	104	126	182	1,44

Anexo B

Preselección de comunas

Tabla B.1: Comunas preseleccionadas.

PRESELECCIÓN DE COMUNAS					
ID	Región	Comuna	ID	Región	Comuna
1	Región Metropolitana de Santiago	Alhué	75	Región Metropolitana de Santiago	Padre Hurtado
2	Región del Biobío	Alto Biobío	78	Región Metropolitana de Santiago	Paine
3	Región de Atacama	Alto del Carmen	79	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Palmilla
5	Región de Coquimbo	Andacollo	81	Región del Maule	Parral
6	Región de Antofagasta	Antofagasta	82	Región del Maule	Pelarco
7	Región del Biobío	Antuco	83	Región de Ñuble	Pemuco
9	Región de Ñuble	Bulnes	84	Región del Maule	Pencabue
12	Región Metropolitana de Santiago	Calera de Tango	85	Región de Tarapacá	Pica
13	Región de Arica y Parinacota	Camarones	87	Región de Ñuble	Pinto
14	Región de Valparaíso	Cartagena	88	Región de Tarapacá	Pozo Almonte
16	Región de Atacama	Chañaral	92	Región de Arica y Parinacota	Putre
17	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Chépica	97	Región del Biobío	Quilaco
19	Región de Ñuble	Chillán Viejo	98	Región del Biobío	Quilleco
24	Región de Ñuble	Colhueco	101	Región del Maule	Rauco
25	Región del Maule	Colbún	103	Región del Maule	Retiro
26	Región Metropolitana de Santiago	Colina	104	Región del Maule	Río Claro
29	Región Metropolitana de Santiago	Curacaví	108	Región del Maule	Romeral
31	Región del Maule	Curepto	109	Región del Maule	Sagrada Familia
32	Región de Ñuble	El Carmen	110	Región de Coquimbo	Salamanca
33	Región Metropolitana de Santiago	El Monte	111	Región de Valparaíso	San Antonio
34	Región del Biobío	Florida	112	Región de Ñuble	San Carlos
36	Región de Atacama	Freirina	113	Región del Maule	San Clemente
43	Región del Maule	Hualañé	114	Región de Ñuble	San Fabián
44	Región del Biobío	Hualqui	115	Región de Ñuble	San Ignacio
45	Región de Coquimbo	Illapel	116	Región del Maule	San Javier
46	Región Metropolitana de Santiago	Isla de Maipo	117	Región Metropolitana de Santiago	San José de Maipo
47	Región de Coquimbo	La Higuera	120	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro
49	Región del Biobío	Laja	121	Región de Antofagasta	San Pedro de Atacama
51	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Las Cabras	122	Región del Biobío	San Rosendo
52	Región del Maule	Licantén	123	Región del Biobío	Santa Bárbara
53	Región de Valparaíso	Limache	124	Región del Biobío	Santa Juana
55	Región del Maule	Longaví	126	Región de Antofagasta	Taltal
57	Región del Biobío	Los Ángeles	127	Región de Atacama	Tierra Amarilla
60	Región de Coquimbo	Los Vilos	128	Región Metropolitana de Santiago	Tiltil
63	Región Metropolitana de Santiago	María Pinto	129	Región de Antofagasta	Tocopilla
67	Región Metropolitana de Santiago	Melipilla	130	Región del Biobío	Tucapel
69	Región del Biobío	Mulchén	131	Región de Valparaíso	Valparaíso
70	Región del Biobío	Nacimiento	132	Región del Maule	Vichuquén
72	Región del Biobío	Negrete	133	Región de Coquimbo	Vicuña
73	Región de Ñuble	Ñiquén	135	Región del Biobío	Yumbel

Anexo C

Preselección de localidades

Tabla C.1: Localidades preseleccionadas.

Preselección de Localidades			
Entidad/Localidad	Distancia a la red [km]	Entidad/Localidad	Distancia a la red [km]
Complejo Aduanero Chungará	84,2860	Hacienda Atacama	0,7777
Trapa Trapa	43,8242	Caleta Chañaral de Aceituno	0,6959
Belén	42,1639	El Hualle	0,5900
Liay	38,0012	Tricauco	0,4068
Lonko Traro	37,6010	El Yali	0,3710
Malla Malla	35,6291	La Paz	0,2328
Illapata	35,3372	Tatara	0,1740
Esquiña	33,3168	Espigado	0,1677
El Barco	32,2209	San Vicente	0,1568
Socoroma	31,5986	Campamento	0,1494
Chefquelafquén	29,5584	Villa Nuevo Amanecer	0,1291
Chenqueco	29,4417	Nueva Esperanza	0,1200
Timar	29,4111	Nicolasa	0,1037
Quiñelón	28,5657	Maitencillo	0,0871
Lepoy Alto	27,9373	Bajo Duqueco	0,0832
Rahueco	25,6595	Unihue	0,0663
Quepuca Interior	23,9401	Cristo Redentor	0,0441
Las Quinguas	23,6123	Estación Nicolasa	0,0407
Guañacagua	23,3142	Callaqui	0,0356
Guatanave	22,4170	Ralco	0,0341
Caleta Los Bronces	21,6297	Curalí	0,0332
Codpa	19,0094	San Lorencito	0,0290
Palmucho	17,6694	Loncopangue	0,0282
Malla	15,5099	Población La Mina	0,0234
Pitril	14,7979	El Rincón	0,0199
Caleta Camarones	9,8674	Taltape	0,0153
El Avellano	9,0414	La Generala	0,0104
Cuya	2,8178	El Prado	0,0072
Camarones	2,7791	San Pedro	0,0030
Carrizalillo	1,5120	Santa Teresa	0,0029
La Puntilla	1,1931	Loica Arriba	0,0017
Las Tablas	0,9451	Villa Las Flores	0,0007
Pumapo	0,9011	Copiulemu	0,0002

Anexo D

Selección de localidades

Tabla D.1: Localidades seleccionadas.

Entidad/Localidad	Latitud	Longitud	Región	Comuna	Categoría	Habitantes	Velocidad viento media diario [m/s]	Irradiación promedio diario [kWh/m ²]	Energía eólica promedio [kWh/m ² /día]	Energía solar promedio [kWh/m ² /día]	Distancia a la red [km]
Guatave	-18.819793	-69.718701	Región de Arica y Parinacota	Camararones	Caserío	62	3.52	6,8770	0.0061	1.4015	22,42
Guñacagua	-18.819205	-69.709926	Región de Arica y Parinacota	Camararones	Caserío	103	3.50	6,8764	0.0060	1.4014	23,31
Timar	-18.750972	-69.692112	Región de Arica y Parinacota	Camararones	Caserío	57	3.49	6,8180	0.0059	1.3895	29,41
Codpa	-18.833763	-69.745521	Región de Arica y Parinacota	Camararones	Caserío	208	3.72	6,7295	0.0072	1.3715	19,01
Socorona	-18.263501	-69.602166	Región de Arica y Parinacota	Putre	Caserío	75	2.77	6,7194	0.0030	1.3694	31,60
Belén	-18.467609	-69.515041	Región de Arica y Parinacota	Putre	Caserío	55	2.49	6,6367	0.0021	1.3526	42,16
Esquina	-18.936678	-69.530512	Región de Arica y Parinacota	Camararones	Caserío	54	3.35	6,5755	0.0052	1.3401	33,32
Complejo Aduanero Chungará	-18.247551	-69.122121	Región de Arica y Parinacota	Putre	Caserío	52	4.10	6,5091	0.0096	1.3266	84,29
Illapata	-18.944515	-69.510019	Región de Arica y Parinacota	Camararones	Caserío	45	3.14	6,3711	0.0043	1.2984	35,34
Caleta Camararones	-19.193221	-70.262788	Región de Arica y Parinacota	Camararones	Caserío	86	2.82	5,7669	0.0031	1.1753	9,87
Caleta Los Bronces	-28.643571	-71.257251	Región de Atacama	Freirina	Caserío	62	2.81	4,9362	0.0031	1.0060	21,63
Las Quingnas	-37.737136	-71.483786	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	53	3.56	4,8808	0.0063	0.9947	23,61
Lonko Traro	-37.753123	-71.274804	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	42	2.28	4,9118	0.0016	1.0010	37,60
Lepoy Alto	-38.078689	-71.410915	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	101	3.34	4,8607	0.0052	0.9906	27,94
Chefquelaquén	-38.001373	-71.319155	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	102	2.65	4,8405	0.0026	0.9865	29,56
Llajay	-37.731429	-71.290901	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	44	3.26	4,8107	0.0048	0.9823	38,00
El Barco	-38.017845	-71.303395	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	184	2.25	4,8214	0.0016	0.9826	32,22
Pitril	-37.812443	-71.487246	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	365	3.19	4,7748	0.0045	0.9731	14,80
Rahueco	-37.745577	-71.438632	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	63	3.36	4,7774	0.0053	0.9736	25,66
Trapa Trapa	-37.708906	-71.246639	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	373	3.60	4,7610	0.0065	0.9703	43,82
Palmucho	-38.021864	-71.468438	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	127	3.72	4,7530	0.0071	0.9687	17,67
Quitón	-38.032840	-71.353383	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	173	3.03	4,7628	0.0039	0.9707	28,57
Chenqueco	-38.006743	-71.375770	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	223	3.27	4,7251	0.0048	0.9630	29,44
Malla	-38.001925	-71.470103	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	171	2.92	4,6820	0.0034	0.9542	15,51
Quepuca Interior	-38.041103	-71.412957	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	76	3.78	4,6708	0.0075	0.9537	23,94
El Avellano	-37.984879	-71.536969	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	90	4.10	4,6154	0.0095	0.9406	9,04
Malla Malla	-37.707245	-71.351730	Región del Biobío	Alto Biobío	Comunidad Indígena	308	2.99	4,5839	0.0037	0.9342	35,63

Anexo E

Localidades descartadas con potencial a ser enclave estratégico

Tabla E.1: Localidades descartadas con potencial a ser enclave estratégico.

Localidad	Región	Comuna	Categoría	Habitantes	Energía eólica promedio [kWh/m ² /día]	Energía solar promedio [kWh/m ² /día]	Distancia a la red [km]
Tatara	Región de Atacama	Freirina	Caserío	189	0,0026	1,2137	5,3331
Cuya	Región de Arica y Parinacota	Camarones	Caserío	166	0,0085	1,2760	2,8178
Camarones	Región de Arica y Parinacota	Camarones	Caserío	66	0,0039	1,3601	2,7791
Carrizalillo	Región de Atacama	Freirina	Caserío	185	0,0171	0,9644	1,5121
Taltape	Región de Arica y Parinacota	Camarones	Caserío	40	0,0028	1,2867	1,4030
La Puntilla	Región de Atacama	Freirina	Caserío	69	0,0068	1,2088	1,1932
Las Tablas	Región de Atacama	Freirina	Caserío	137	0,0051	1,1410	0,9452
Hacienda Atacama	Región de Atacama	Freirina	Caserío	117	0,0038	1,1839	0,7775
Caleta Chañaral de Aceituno	Región de Atacama	Freirina	Asentamiento Pesquero	197	0,0179	0,9502	0,6958
El Yali	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	Caserío	81	0,0009	1,0552	0,3710
San Vicente	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	Caserío	98	0,0071	1,0618	0,1567
Villa Nuevo Amanecer	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	Caserío	159	0,0009	1,0564	0,1291
Nicolasa	Región de Atacama	Freirina	Caserío	43	0,0039	1,1907	0,1037
Maitencillo	Región de Atacama	Freirina	Aldea	553	0,0073	1,2068	0,0871
Estación Nicolasa	Región de Atacama	Freirina	Caserío	70	0,0038	1,1862	0,0407
Población La Mima	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	Caserío	134	0,0023	1,0565	0,0234
El Prado	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	Aldea	409	0,0039	1,0510	0,0071
San Pedro	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	Aldea	593	0,0011	1,0601	0,0030
Santa Teresa	Región de Atacama	Freirina	Caserío	126	0,0039	1,1907	0,0028
Loica Arriba	Región Metropolitana de Santiago	San Pedro	Caserío	86	0,0055	1,0556	0,0018

Anexo F

Costo de inversión inicial por habitante de cada comunidad

Tabla F.1: Cálculo del costo de inversión inicial por habitante de cada comunidad.

Localidad	Consumo Zona Térmica [kWh/viv./año]	Consumo promedio [kWh/día]	Contribución eólica promedio [kWh/día]	Contribución solar promedio [kWh/día]	$P_{\text{ético}}$ promedio [kW]	P_{solar} promedio [kW]	Inv_0 promedio [MCLP]	Inv_0 /hab. [MCLP/hab.]
Guatanave	1428,00	60,64	3,03	57,61	2,47	8,38	13,88	0,22
Guañacagua	1428,00	100,74	5,04	95,71	4,19	13,92	23,18	0,23
Timar	1428,00	55,75	2,79	52,96	2,34	7,77	12,94	0,23
Codpa	1428,00	203,44	10,17	193,27	7,04	28,72	45,44	0,22
Socoroma	1428,00	73,36	3,67	69,69	6,14	10,37	21,78	0,29
Belén	1428,00	53,79	2,69	51,10	6,23	7,70	18,67	0,34
Esquiña	1428,00	52,82	2,64	50,18	2,51	7,63	13,03	0,24
Complejo								
Aduanero	1428,00	50,86	2,54	48,32	1,32	7,42	10,99	0,21
Chungará								
Illapata	1428,00	44,01	2,20	41,81	2,54	6,56	11,77	0,26
Caleta Camarones	1428,00	84,12	4,21	79,91	6,68	13,85	26,83	0,31
Caleta Los Bronces	1428,00	60,64	3,03	57,61	4,86	11,67	21,45	0,35
Las Quinguas	1793,00	65,09	3,25	61,83	2,57	12,67	19,23	0,36
Lonko Traro	1793,00	51,58	2,58	49,00	7,79	9,97	23,76	0,57
Lepoy Alto	1793,00	124,04	6,20	117,83	5,94	24,24	38,34	0,38
Chefquelaquén	1793,00	125,26	6,26	119,00	11,96	24,58	47,75	0,47
Liay	1793,00	54,04	2,70	51,33	2,79	10,65	17,12	0,39
El Barco	1793,00	225,97	11,30	214,67	35,42	44,52	107,05	0,58
Pitiril	1793,00	448,25	22,41	425,84	24,71	89,17	145,33	0,40
Rahueco	1793,00	77,37	3,87	73,50	3,65	15,38	24,15	0,38
Trapa Trapa	1793,00	458,07	22,90	435,17	17,48	91,39	137,24	0,37
Palmucho	1793,00	155,97	7,80	148,17	5,42	31,17	46,00	0,36
Quínelón	1793,00	212,46	10,62	201,84	13,56	42,37	71,78	0,41
Chenqueco	1793,00	273,86	13,69	260,17	14,03	55,05	87,90	0,39
Malla	1793,00	210,00	10,50	199,50	15,10	42,61	74,36	0,43
Quepuca Interior	1793,00	93,33	4,67	88,67	3,07	18,94	27,62	0,36
El Avellano	1793,00	110,53	5,53	105,00	2,87	22,75	31,95	0,35
Malla Malla	1793,00	378,25	18,91	359,34	25,29	78,38	133,08	0,43