

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**PROPUESTA METODOLÓGICA DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA
RESIDUAL DE CULTIVOS AGRÍCOLAS EN LA REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

NICOLE MACARENA MONTENEGRO VARELA

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**PROPUESTA METODOLÓGICA DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA
RESIDUAL DE CULTIVOS AGRÍCOLAS EN LA REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

**METHODOLOGICAL PROPOSAL OF CROP WASTE BIOMASS
EXPLOITATION IN ARAUCANIA REGION**

NICOLE MACARENA MONTENEGRO VARELA

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**PROPUESTA METODOLÓGICA DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA
RESIDUAL DE CULTIVOS AGRÍCOLAS EN LA REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

**Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables**

NICOLE MACARENA MONTENEGRO VARELA

	Calificaciones
Profesor Guía Sr. Manuel Paneque C. Bioquímico, Dr.	7.0
Profesores Evaluadores	
Sr. Máximo Alonso V. Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc. Ph. D.	7.0
Sr. Fernando Santibáñez Q. Ingeniero Agrónomo, Dr. Es. Sci.	7.0
Colaborador Sr. Gerardo Ubilla B. Geógrafo, Mg.	

Santiago, Chile

2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por preparar mi camino hasta donde he llegado y porque siempre me ha acompañado siempre. Es quien ha visto mi esfuerzo y lo ha premiado grandemente.

Me siento profundamente agradecida de mis padres, quienes me han formado y me han dado lo mejor que han podido en cada momento. Es invaluable el cariño y la comprensión de mi mamita, así como también la incondicionalidad de mi papá y de mi hermano.

También agradezco a quienes han estado en toda mi vida y que han sido parte de mi crecimiento...

A mi abuelito por enseñarme que tengo que ser una gran mujer y esforzarme por llegar alto.

A mi amiga Alejandra por ser mi hermana de vida y apoyarme en los buenos y malos momentos.

A mis tíos por apoyar a mi familia en todo momento.

Finalmente le doy infinitas gracias a mi profesor guía Manuel Paneque, que ha confiado en mis capacidades y ha sido parte de mi formación como profesional.

Gracias a todos los que han aportado en este proceso y en mi vida, porque sin duda han sido fundamentales para llegar hasta donde estoy.

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	13
2. ABSTRACT.....	14
3. INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	17
4. ESTADO DEL ARTE.....	18
4.1 MERCADO ENERGÉTICO.....	18
4.2 FUENTES DE BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS.....	19
4.2.1 <i>Residuos de cultivos agrícolas</i>	21
4.2.2 <i>Residuos forestales</i>	23
4.2.3 <i>Estiércol de la actividad ganadera</i>	24
4.3 TECNOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS DE CULTIVOS	26
4.4 <i>Caracterización de los procesos de conversión y su inserción mundial</i>	28
4.5 BIOCMBUSTIBLES DERIVADOS A PARTIR DE RESIDUOS DE MAÍZ Y TRIGO.....	31
4.6 CARACTERIZACIÓN MUNDIAL Y NACIONAL DE LOS RESIDUOS DE MAÍZ Y TRIGO.....	33
4.6.1 <i>Distribución nacional y regional de los residuos</i>	34
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
5.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	37
5.2 MATERIALES	37
5.3 METODOLOGÍA	38
5.3.1 DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL DE MAÍZ Y TRIGO	38
5.3.1.1 <i>Producción de residuos de maíz y trigo</i>	38
<i>Estimación biomasa residual por método la Relación Residuo-Producto</i>	38
<i>Estimación biomasa residual por método de coeficiente de residuos no utilizados</i>	39
5.3.1.2 <i>Dispersión espacial de los residuos de maíz y trigo</i>	40
5.3.1.3 <i>Variación estacional de residuos de maíz y trigo</i>	40
5.3.1.4 <i>Uso actual de los residuos de trigo y maíz</i>	41
5.3.2 ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LOS RESIDUOS DE MAÍZ Y TRIGO	41
5.3.3 DEFINICIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS DE ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO	42
5.3.3.1 <i>Definición de criterios de la demanda para definir las áreas prioritarias de abastecimiento energético</i>	42
5.3.3.2 <i>Cartografía y normalización de criterios de alta demanda para la identificación de áreas prioritarias de abastecimiento</i>	43
5.3.3.4 <i>Cartografía y normalización de criterios de demanda potencial para la identificación de áreas prioritarias de abastecimiento</i>	44

5.3.3.5	<i>Cartografía y normalización de criterios de demanda social para la identificación de áreas prioritarias de abastecimiento</i>	45
5.3.3.6	<i>Ponderación de criterios de identificación de áreas prioritarias de abastecimiento energético de alta demanda, demanda potencial y demanda social.</i> .	45
5.3.4	PROCEDIMIENTO DE PROPUESTA DE SITIOS PARA EL EMPLAZAMIENTO PLANTAS BIOENERGÉTICAS.....	46
5.3.4.2	<i>Definición de criterios para el emplazamiento de plantas bioenergéticas</i>	47
5.3.4.3	<i>Cartografiar criterios</i>	48
5.3.4.4	<i>Normalización de criterios</i>	49
5.3.4.5	<i>Elaboración de escenarios para la propuesta de emplazamientos de plantas bioenergéticas</i>	50
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
6.1	DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL DE TRIGO Y MAÍZ.....	53
6.1.1	<i>Producción de residuos de maíz y trigo en la Región de La Araucanía.</i>	53
	<i>Estimación por método de coeficiente de residuos no utilizados</i>	54
6.1.2	<i>Dispersión espacial de los residuos de maíz y trigo.</i>	55
6.1.3	<i>Variación estacional de residuos de maíz y trigo en la Región de la Araucanía</i>	59
6.1.4	<i>Uso actual de los residuos de trigo y maíz en la Región de la Araucanía</i>	60
6.2	ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LOS RESIDUOS DE MAÍZ Y TRIGO CON COMBUSTIÓN Y GASIFICACIÓN.	61
6.3	ÁREAS PRIORITARIAS DE ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO EN LA REGIÓN DE LA ARAUCANÍA	62
6.3.1	<i>Definición de áreas para alta demanda</i>	62
6.3.2	<i>Definición de áreas para demanda potencial</i>	63
6.3.3	<i>Definición de áreas para la demanda social</i>	64
6.4	PROPUESTA DE SITIOS PRIORITARIOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE PLANTA BIOENERGÉTICAS.....	66
6.4.1	<i>Cartografías de factores y limitantes para la elaboración de escenarios</i>	66
6.4.2	<i>Propuesta de sitios para emplazamiento de plantas bioenergéticas según Escenario Social.</i>	67
6.4.3	<i>Propuesta de sitios para emplazamiento de plantas bioenergéticas según escenario de factibilidad.</i>	68
6.4.4	<i>Propuesta de sitios para emplazamiento de planta bioenergéticas según Escenario de Demanda.</i>	70
7.	CONCLUSIÓN	74
8.	BIBLIOGRAFÍA	76
9.	APÉNDICE	83
	APÉNDICE I. CAPAS TEMÁTICAS QUE SE UTILIZARON PARA LA OBTENCIÓN DE LAS ZONAS PRIORITARIAS DE ALTA DEMANDA.....	83
	APÉNDICE II. CAPA TEMÁTICA QUE SE UTILIZÓ PARA LA OBTENCIÓN DE LAS ZONAS PRIORITARIAS DE DEMANDA POTENCIAL.....	85

APÉNDICE III. CAPAS TEMÁTICAS QUE SE UTILIZARON PARA LA OBTENCIÓN DE LAS ZONAS PRIORITARIAS DE DEMANDA SOCIAL.....	85
APÉNDICE IV. CAPAS TEMÁTICAS DE FACTORES QUE SE UTILIZARON PARA LA DETERMINACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE UNA PLANTA DE BIOMASA.....	87
APÉNDICE V. CAPAS TEMÁTICAS DE LIMITANTES QUE SE UTILIZARON PARA LA DETERMINACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE UNA PLANTA DE BIOMASA.....	89

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Superficie, producción y rendimiento de cultivos anuales en los años agrícolas 2000/01.....	35
Cuadro 2 Producción nacional de biomasa residual de cereales en materia seca [t/año]	35
Cuadro 3 Producción y residuos de maíz y trigo a nivel nacional	36
Cuadro 4 Índices de cosecha de maíz y trigo	39
Cuadro 5 Coeficientes de residuos no utilizados de maíz y trigo	40
Cuadro 6 Eficiencia de plantas de combustión y gasificación	41
Cuadro 7 Valor asignado a la distancia desde las industrias y cantidad de industrias.....	44
Cuadro 8 Valor asignado al consumo eléctrico	44
Cuadro 9 Valor asignado a la cobertura eléctrica	44
Cuadro 10 Valor asignado a la distancia a asentamientos rurales	45
Cuadro 11 Pesos de los criterios por tipo de demanda.....	45
Cuadro 12 Pesos de los tipos de demanda	46
Cuadro 13 Valores discretos de la biomasa residual.....	49
Cuadro 14 Valores discretos de los usos/coberturas de suelo.....	49
Cuadro 15 Valores discretos de los tipos de caminos.	49
Cuadro 16 Valores discretos de la distancia a la red de distribución.....	50
Cuadro 17 Escala de posición continua	50
Cuadro 18 Matriz de preferencia de escenario social	51
Cuadro 19 Pesos relativos de criterios para el escenario social	51
Cuadro 20 Matriz de preferencia del escenario de factibilidad.....	52
Cuadro 21 Pesos relativos de factores en escenario de factibilidad.....	52
Cuadro 22 Matriz de preferencia del escenario de demanda	52
Cuadro 23 Pesos relativos de factores del escenario de demanda	52
Cuadro 24 Mayores productores de biomasa residual de maíz y trigo con método de la....	53
Cuadro 25 Mayores productores de biomasa residual de maíz y trigo con método de.....	54
Cuadro 26 Producción media mensual regional	60
Cuadro 27 Generación de energía en Quilquén	61
Cuadro 28 Cumplimiento de los escenarios considerados para la instalación de plantas de	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Relación entre el consumo de electricidad y la expansión del PIB de Chile.....	19
Figura 2 Matriz de biomasa con fines energéticos a nivel mundial.....	20
Figura 3 Matriz de biomasa con fines energética en Chile	21
Figura 4 Procesos de conversión de residuos lignocelulósicos a bioenergía.....	27
Figura 5 Distribución mundial de la producción de biomasa residual de maíz	34
Figura 6 Distribución mundial de la producción de biomasa residual de trigo.	34
Figura 7 Área de estudio enmarcada en la región de la Araucanía (UTM 19 S, WGS 84) .	37
Figura 8 Variables a considerar para el establecimiento de áreas de consumo energético..	46
Figura 9 Biomasa residual de maíz según método RRP.....	56
Figura 10 Biomasa residual de trigo según método RRP.....	57
Figura 11 Biomasa residual de maíz según método coeficientes de residuos.....	58
Figura 12 Biomasa residual de trigo según método coeficientes de residuos.....	59
Figura 13 Producción de energía según el tipo de tecnología y magnitud de biomasa.	62
Figura 14 Sitios prioritarios de alta demanda	63
Figura 15 Sitios prioritarios de demanda potencial (baja electrificación)	64
Figura 16 Sitios prioritarios demanda social.....	65
Figura 17 Sitios prioritarios totales.....	66
Figura 18 Localización de plantas bioenergéticas en escenario social.....	68
Figura 19 Localización de plantas bioenergéticas en Escenario de factibilidad 1 (Biomasa 5320.....	69
Figura 20 Localización de plantas bioenergéticas en Escenario de factibilidad 2.....	70
Figura 21 Localización de plantas bioenergéticas en Escenario de alta demanda.....	71
Figura 22 Localización de plantas bioenergéticas para los tres escenarios en conjunto.....	73
Figura 23 Cantidad de industrias por distrito.....	83
Figura 24 Distancia a industrias.....	83
Figura 25 Consumo eléctrico por comuna.....	84
Figura 26 Alta demanda.....	84
Figura 27 Demanda potencial, distritos no electrificados.....	85
Figura 28 Distancia a centros de salud.....	85
Figura 29 Distancia a establecimientos rurales.....	86
Figura 30 Distancia a asentamientos consumidores de leña.....	86
Figura 31 Demanda social.....	87
Figura 32 Biomasa residual de maíz y trigo método RRP.....	87
Figura 33 Usos de suelo	88
Figura 34 Buffer de caminos, diferenciado por tipos.....	88
Figura 35 Distancia a red eléctrica de distribución.....	89
Figura 36 Distritos con biomasa superior a 5320 [t].....	89
Figura 37 Distritos con biomasa superior a 8290 [t].....	90
Figura 38 Áreas no restringidas.....	90

Glosario de siglas, abreviaturas y unidades

Siglas institucionales y de organizaciones

AMIS	Agricultural Market Information System
BCN	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
CCTP	Comisión Ciudadana-Técnico-Parlamentaria
CDEC	Centro de Despacho Económico de Carga
CEPAL	Comisión Económica para América Latina
CIE	Centro de Innovación en Energía de la Universidad Técnica Federico Santa María
CIREN	Centro de Información de Recursos Naturales
CNE	Comisión Nacional de Energía
CONAF	Corporación Nacional Forestal
CONICYT	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
DGRAG	Dirección General de Recursos Agrícolas
EIA	Energy Information Administration
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
INE	Instituto Nacional de Estadísticas
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MMA	Ministerio de Medio Ambiente
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODEPA	Oficina de Estudios y Políticas Agrarias
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
SIC	Sistema Interconectado Central
UNEP	United Nations Environmental Programme
UTFSM	Universidad Técnica Federico Santa María

Abreviaturas

AHP	Analytic Hierarchy Process
APP	Áreas Protegidas Privadas
C/ST	Combustion/Steam Turbine
CASEN	Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional
CHP	Combined Heat and Power
CI	Combustión Interna
CIIU	Clasificación Industrial Internacional Uniforme
CO ₂	Dióxido de Carbono
EMC	Evaluación Multicriterio
G/CC	Gasification Combined Cycle
GEI	Gases de Efecto Envernadero
IC	Índice de Cosecha
IDE	Infraestructura de Datos Espaciales
PIB	Producto Interno Bruto
RETC	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
RRP	Ratio Residuo Producto
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SIC	Sistema Interconectado Central
SIIT	Sistema Integrado de Información Territorial
SIG	Sistema de Información Geográfico
SNASPE	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado

Nomenclatura de unidades usadas

°C	Grados Celsius
EJ	Exajoule (10 ⁸ Joule)
GW _{th}	Gigawatts de energía térmico
J	Joule

kg	Kilogramo
km	Kilometro
h	Hora
ha	Hectárea
Mha	Miles de hectáreas
MMha	Millones de hectáreas
Mm ³	Miles de metros cúbicos
MMl	Miles de litros
Mt	Miles de toneladas
MMt	Millones de toneladas
MW	Megawatts
MWh	Megawatt-hora
qqm	Quintales métricos
t	Tonelada
Tcal	Teracalorías
TWh	Terawatts-hora

1. RESUMEN

La biomasa residual agrícola, es una fuente de energía que aparece dispersa en el territorio. La dispersión territorial que caracteriza a la biomasa genera importantes costes de logística de aprovisionamiento, y constituye uno de los principales obstáculos en su desarrollo. La necesidad de que las instalaciones de valorización energética tengan garantizado el suministro a lo largo de su vida útil, junto al condicionante de costes, justifica una adecuada evaluación y caracterización de la distribución geográfica de este recurso que contemple su evolución en el tiempo.

El objetivo y propósito principal de esta investigación es elaborar una propuesta metodológica para el aprovechamiento de la biomasa residual de cultivos agrícolas en la región de la Araucanía, bajo la necesidad nacional de generar nuevas alternativas de generación que permitan ampliar la matriz energética y reducir la dependencia a los combustibles fósiles. Además, se identificaron las zonas con mayores necesidades energéticas, que permiten proponer sitios prioritarios de localización de plantas de bioenergía, y por último analizar las tecnologías de conversión energética óptimas.

La biomasa residual se cuantificó mediante el método relación residuo-producto (RRP) y el método de coeficientes de residuos no utilizados. El método del RRP caracteriza una producción de 4,72 [Mt año⁻¹] de maíz y 622 [Mt año⁻¹] de trigo, mientras el método de coeficientes de residuos no utilizados caracteriza una producción de biomasa de residuos de maíz de 3,462 [Mt año⁻¹] y de trigo de 190,54 [Mt año⁻¹]. El análisis espacial de la dispersión de biomasa se realizó elaborando una cartografía en escala distrital de las magnitudes de producción, utilizando ArcGis.

Los distritos de General López, La Selva, Rehuecoyán, Quilquén y Quilquilco fueron identificadas mediante el método de Evaluación Multicriterio (EMC) como sitio prioritarios de abastecimiento energético y sitios de instalación de plantas bioenergéticas, bajo escenarios de alta demanda, de factibilidad e impacto social.

Los resultados generados son un acercamiento al de los residuos de cultivos agrícolas con fines energéticos, y su disponibilidad, reduciendo la incertidumbre de su cuantificación, distribución espacial y temporal de modo de facilitar la inserción de nuevos proyectos energéticos con recursos locales.

Palabras claves: bioenergía, coeficientes de residuos no utilizados, EMC, matriz energética y ratio residuo-producto.

2. ABSTRACT

Agricultural residual biomass is a source of energy which is dispersed across the territory. The territorial dispersion, which characterizes biomass, generates significant logistics costs of supply, and is one of the main obstacles in its development. The need for energy recovery plants of having guaranteed supply over its lifetime together with the costs constraint, justifies an appropriate evaluation and characterization of the geographical distribution of this resource that contemplates its evolution over time.

The main objective and purpose of this research is developing a methodological proposal for the use of residual biomass of agricultural crops in the Araucanía region. This is under the national need to generate new generation alternatives which allow expanding the energy matrix, and reducing dependence to fossil fuels. In addition, areas with higher energy needs were identified allowing propose priority sites of the location of bioenergy plants, and finally analyze optimal energy conversion technologies.

Residual biomass has been quantified through the Residue-to-Product Ratio method (RPR) and the coefficient unused residues method. The RPR method characterizes a corn production of 4.72 [Mt yr⁻¹] and a wheat production of 622 [Mt yr⁻¹]. While the coefficient unused residues method characterizes a residual biomass of corn production of 3,462 [Mt yr⁻¹] and of wheat production of 190,54 [Mt yr⁻¹]. Spatial analysis of the biomass dispersion was carried out by developing a district scale cartography of the magnitudes of production using ArcGis.

Districts of General López, La Selva, Rehuecoyán, Quilquén y Quilquilco were identified through Multi-Criteria Evaluation method (MCE) as priority sites of energy supply and installation sites of bioenergy plants under scenarios of high demand, feasibility and social impact.

The generated results are an approach to the agricultural crops residues for energy purpose and their availability allowing reduce uncertainty of their quantification, and spatial and temporal distribution in order to facilitate the insertion of new energy projects with local resources.

Keywords: bioenergy, coefficient unused residues, energy matrix, MCE and residue-to-product ratio.

3. INTRODUCCIÓN

El petróleo y el gas natural abastecen el 55,9% del consumo de energía primaria en el mundo (EIA, 2013), mientras que en Chile los combustibles fósiles cubren el 66% del suministro de energía (Ministerio de Energía, 2013), de lo cual se importa el 94% del petróleo, 94% del carbón y 80% de gas natural (Ministerio de Energía, 2013). Esta matriz concentrada en combustibles fósiles importados, genera un escenario de dependencia energética y vulnerabilidad a las condiciones internacionales, como por ejemplo, la volatilidad de los precios, lo que se traduce en un alza sostenida de los valores de transacción (CIE *et al.*, 2008).

Externalidad paralela es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), producto de la quema de combustibles fósiles, uno de los causantes del calentamiento global (MMA, 2012a). Chile se comprometió en el año 2010, a reducir sus emisiones en un 20% por debajo de las proyectadas para el año 2020 (MMA, 2012a), sin embargo, según tendencias actuales, se prevé un incremento del 360% en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), tanto en la generación eléctrica como en el transporte, emisión que actualmente es de un 0,3% del total mundial (O`Ryan *et al.*, 2010).

El modelo eléctrico de generación concentrada y de despacho centralizado, apuntan a la instalación de proyectos energéticos de gran envergadura que sean capaces de suministrar energía a largas distancias, a través de un único sistema de transmisión, haciendo de este un proceso ineficiente que causa desequilibrios territoriales, pues se explotan grandes magnitudes de recursos en una localidad para luego llevar esa energía a punto lejano de consumo (CCTP, 2011).

Se hace inminente la necesidad de transformar la matriz energética, basándose en alternativas más sustentables, que consideren la disponibilidad de los recursos en el tiempo, las externalidades de los procesos de conversión (por ejemplo: contaminación de aire y aguas), seguridad en el suministro y la equidad en el abastecimiento y precios de la energía (Ministerio de Energía, 2012b).

Dentro de las distintas alternativas de energías renovables, la bioenergía es de aplicación transversal, ya que la biomasa es la única fuente de energía renovable que puede sustituir a los combustibles fósiles en todos los mercados energéticos (producción de calor, electricidad y combustibles para el transporte) y es la cuarta mayor fuente de energía después de gas de carbón, petróleo y gas natural (FAO, 2009). La bioenergía provee el 10% de la energía primaria en el mundo y sustenta el 1,4% de la producción de electricidad a nivel nacional (IEA, 2012b; CCTP, 2011).

La bioenergía se obtiene a partir de la fracción degradable de los productos, desechos o residuos de diversos sectores productivos antrópicos y naturales, como la agricultura, silvicultura, residuos industriales o municipales entre otros (ODEPA, 2008). Además tiene

como ventajas la neutralidad CO₂ y su eficiencia en la conversión energética, lo cual se alinea con las tecnologías y propósitos país de la Estrategia Nacional de Energía, de desacoplar el crecimiento económico del consumo de energía al año 2020 mediante la eficiencia energética entre otros mecanismos (Ministerio de Energía, 2012b).

En Chile la biomasa es utilizada a nivel industrial para abastecimiento energético en procesos internos mediante cogeneración, y sus los excedentes de energía eléctrica son inyectados a la red (CEPAL, 2004). A nivel local esta tecnología se ha aplicado en localidades rurales aisladas impulsadas por el Programa de electrificación Rural, iniciado el año 1999 por la Comisión Nacional de Energía (CNE) en conjunto con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el cual abasteció de energía eléctrica a 31 familias de la Región de Los Lagos mediante tecnología de gasificación (CEPAL, 2004).

Las alternativas de biocombustibles viables actualmente son el biodiésel y el etanol, en reemplazo o complemento del diésel y gasolina respectivamente, biogás para el gas natural y otros como sólidos, leña, pellets y briquetas (Paneque *et al.*, 2011). El biodiesel de primera generación se puede obtener de aceites provenientes de cultivos como la palma aceitera, la soya, el raps y la maravilla, mientras que el de segunda generación es posible ser obtenido de residuos agrícolas a través de procesos termoquímicos (Machado, 2010).

El biodiesel se produce a partir de aceites provenientes de diferentes cultivos, principalmente de palma aceitera, soya, raps y maravilla. El bioetanol proviene de la fermentación de biomasa rica en carbohidratos, principalmente de cultivos como maíz y caña de azúcar (Paneque *et al.*, 2011). El biogás se puede producir mediante residuos agrícolas y forestales, excremento de animales, lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas, entre otros (Chamy y Vivanco, 2007). Las fuentes de biomasa son diversas y en la actualidad una gama de ellas generan energía que se despacha al Sistema Interconectado Central (SIC), como la lignocelulósica forestal Celulosa Arauco y Constitución con 24 [MW], los lodos de la planta de tratamiento Loma Los Colorados con 15,4 [MW] y los residuos de viñedo en la Central Térmica de biomasa Viñales con 30 [MW] de capacidad, entre otros (CDEC-SIC, 2013).

Existe un potencial de residuos de biomasa que no está siendo aprovechado en la industria, ni como subproducto, ni como energía, estos corresponden a los residuos post-cosecha de cereales, los cuales son generalmente quemados para evitar la propagación de plagas, controlar la maleza y reducir los periodos entre cultivos; sin embargo ésta práctica genera externalidades negativas como reducir la materia orgánica del suelo, contribuir a la degradación y pérdida de las propiedades físicas del recurso (CONAF, 2008).

Los residuos de cereales se concentran en la zona centro sur del país, destacando las regiones de La Araucanía y del Libertador General Bernardo O'Higgins con el 29,3% y el 19,8%, respectivamente de un total de 3.584.232 t año⁻¹ (Gatica y Alonso, 2013). Se prevé que este potencial será parcialmente aprovechado por tres proyectos energéticos que están aprobados por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) los que se alimentarán de biomasa residual de cereales, que en combinación con otras fuentes de biomasa como la

urbana, forestal y agroindustrial, generarán entre 15 a 25 [MW] y estarán emplazados desde la región O`Higgins a La Araucanía (Gatica y Alonso, 2013). Una de las dificultades que se presentan en la elaboración de este tipo de proyectos es que no se cuenta con información espacial de la disponibilidad de biomasa, sino que la información disponible está en escala global asociada a una cifra generalmente regional (CIE *et al.*, 2008).

Frente a este problema y a la necesidad de alternativas energéticas sustentables de carácter local, se plantea el desarrollo de una propuesta metodológica de aprovechamiento energético de residuos de cultivos agrícolas de carácter espacial, orientada a tres aspectos: caracterización y cuantificación de la biomasa, identificación de centros prioritarios de abastecimiento energético y de localización de plantas bioenergéticas y por último conversión de energía (tipo de tecnología y su potencial localización). Para ello se utilizaron Sistemas de Información Geográficos (SIG) aplicados en la región de la Araucanía, por su alta producción de cereales, evaluándose en esta propuesta trigo y maíz.

Objetivo general

Desarrollar una propuesta metodológica para el aprovechamiento de la biomasa residual de cultivos agrícolas en la Región de La Araucanía.

Objetivo específicos

- Identificar la disponibilidad de la biomasa residual de trigo y maíz, a partir de su producción, dispersión espacial, variación estacional y uso actual.
- Establecer áreas prioritarias para abastecimiento energético y para instalación de plantas bioenergéticas.
- Evaluar las opciones tecnológicas para el aprovechamiento energético, considerando los sistemas disponibles actuales.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 Mercado energético

El consumo mundial de energía en el año 2011 fue de 8.918×10^4 [Tcal], equivalente a 350 veces el consumo de Chile para el mismo año, la tendencia de la demanda en las últimas décadas es al alza, cercana al 3% y se prevé que esto se mantendrá hasta el 2030, siendo más acentuada en países en desarrollo, como consecuencia del crecimiento demográfico y económico (IEA, 2013; Ministerio de Energía, 2013).

La demanda se distribuye de forma heterogénea, concentrándose en los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) con un 40,1%, China (18,4%) y Asia (12,5%); el menor consumo es en África con un 5,9%. (IEA, 2013). La mayor energía consumida proviene del petróleo 40,8%, la electricidad como energía secundaria provee el 17,7% del total, mientras que las energías renovables proveen la menor fracción (3,4%), pero se pronostica que esta fracción aumentará en un 1,9% anual durante los próximos decenios, con un mayor incremento absoluto en América del Norte y en países en de desarrollo de Asia (IEA, 2013).

En Chile el consumo de energía primaria en el año 2012 fue de 315.585,5 [Tcal], concentrándose en tres fuentes: petróleo con un 31%, leña y biomasa 28% y carbón 21%. En cuanto al consumo de energía secundaria fue de 285.414,7 [Tcal] y su composición es similar a la anterior; los derivados del petróleo lideran con fracción de un 55 %, la electricidad 19% y la leña y biomasa 18% (Ministerio de Energía, 2013).

Chile, ha registrado un 6,7% de aumento promedio en el consumo de energía eléctrica durante los últimos 20 años, el que se encuentra acoplado al crecimiento económico del país, con valores del Producto Interno Bruto (PIB) que bordean el 4,5% anual entre el 2000 y 2012 (Figura 1). A pesar que el acoplamiento del PIB y la demanda eléctrica es una tendencia esperable en economías en desarrollo, para Chile es un desafío poder desacoplar ambos crecimientos, incluso llegar a reducir los consumos de energía mediante la inserción de nuevas tecnologías y la eficiencia energética (Ministerio de Energía, 2011b).

Durante la década del 70, varios países de la OCDE desacoplaron el consumo eléctrico del crecimiento económico, por medio de la conversión de su economía industrial a una economía de servicios, a la eficiencia energética, y utilización de nuevas fuentes de energía (CNE, 2008). El acoplamiento del crecimiento económico al consumo de energía, es una tendencia que se ha presentado en Chile desde la década del 60, pero se ha atenuado a partir del año 2008 (Figura 1; Ministerio de Energía, 2013).

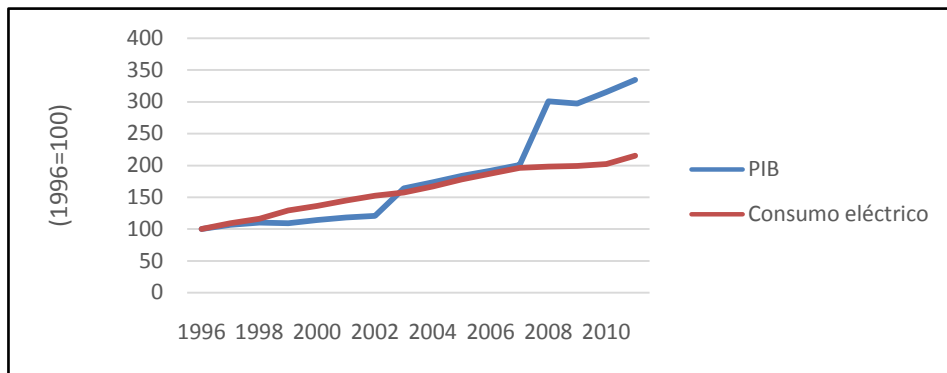


Figura 1 Relación entre el consumo de electricidad y la expansión del PIB de Chile.
Fuente: Elaboración propia en base al Balance Nacional de Energía año 2012 (Ministerio de Energía, 2013) y el PIB regional de Chile (INE Los Lagos, 2012).

El precio de la electricidad de consumo industrial en Chile para el 2011 fue de 154 US\$ [MWh⁻¹], lo que lo sitúa como el sexto país con el precio más alto de los 34 miembros de la OCDE, y con 40 US\$ sobre el promedio del precio de los países de la OCDE, diferencia que se ha incrementado desde el 2007, tendiendo al alza (BCN, 2011). Si se compara Chile con los países latinoamericanos, este registra los precios más altos, tanto para la industria, como para los hogares (BCN, 2011).

La relación entre el precio de los combustibles y el ingreso económico que se presenta en Chile y en general en Latinoamérica evidencian la desigualdad de estos países en el acceso a la energía, son los estratos económicos más bajos los que deben pagar una mayor fracción de sus ingresos para acceder a calefacción o electricidad entre otros servicios energéticos (CEPAL, 2009). Si se compara el gasto del primer quintil y el quinto quintil en el país, se tiene que el primer quintil más pobre debe gastar ocho veces más dinero (en relación a su ingreso), que el quinto quintil. (CEPAL, 2009).

La necesidad de desacoplar el crecimiento económico del PIB, sumado a las inequidades sociales en el acceso energético que Chile debe superar, suponen un desafío pero al mismo tiempo una oportunidad para fomentar la inserción de nuevas tecnologías más económicas y de acceso local, que a su vez sean más eficientes.

4.2 Fuentes de biomasa con fines energéticos

La biomasa es la fracción biodegradable de los productos y residuos de la agricultura, silvicultura, ganadería, industria y hogares (ODEPA, 2008). La biomasa se caracteriza por ser una fuente de energía renovable, que puede ser utilizada para generar electricidad, calor y combustibles, tanto líquidos como gaseosos (ODEPA, 2008). En el 2008, la biomasa suministró alrededor del 10% de la energía primaria mundial (50,3 [EJ año⁻¹]), y se destacan dentro de la matriz de energías renovables, por ser la mayor fuente de energía con

un 78% (IEA, 2012a), pero su uso difiere significativamente por región. En África el 47,8% de la oferta total de energía primaria en el 2010 provenía de biomasa, mientras que en los países de la OCDE esta cifra solo correspondió al 4,5% (IEA, 2012a).

Se prevé que la utilización de bioenergía se extenderá y crecerá en magnitud, debido al rol crucial que tiene en la mitigación del cambio climático, por ser una fuente que captura carbono y que podría reemplazar a los combustibles fósiles, reduciendo en un 80 a 90% la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), con respecto a la línea base de energía fósil (IPCC, 2012).

Los países importadores de petróleo deben buscar alternativas de suministro, debido a la vulnerabilidad de abastecimiento, sujeto a la escasez de combustibles fósiles y la volatilidad de los precios (IPCC, 2012). La biomasa ofrece mayor seguridad energética, por ser una fuente local, con alta disponibilidad en sus variados tipos y con precios que día a día se tornan más competitivos (IPCC, 2012).

El potencial teórico total de la bioenergía es de 1.500 [EJ año⁻¹], sin embargo el potencial técnico alcanza un máximo de 300 [EJ año⁻¹], pues se deben considerar restricciones en el aprovechamiento energético de acuerdo a otros usos de esta fuente, como forraje para alimentación, además de otros factores que influyen en su producción, como la evolución de la agricultura y la silvicultura, el cambio climático (impactos sobre el uso futuro de la tierra) y la escasez de agua, entre otros (IPCC, 2012).

Las fuentes de biomasa con mayor generación energética son las provenientes de la leña (67%), la actividad forestal (11%) y agrícola (10%; Figura 2). Dentro del rubro forestal se encuentran los residuos forestales, el licor negro, los residuos de la industria maderera y la madera recuperada, por su parte el sector agrícola aporta con los cultivos energéticos, los residuos de cultivos y el estiércol de animales (IPCC, 2012).

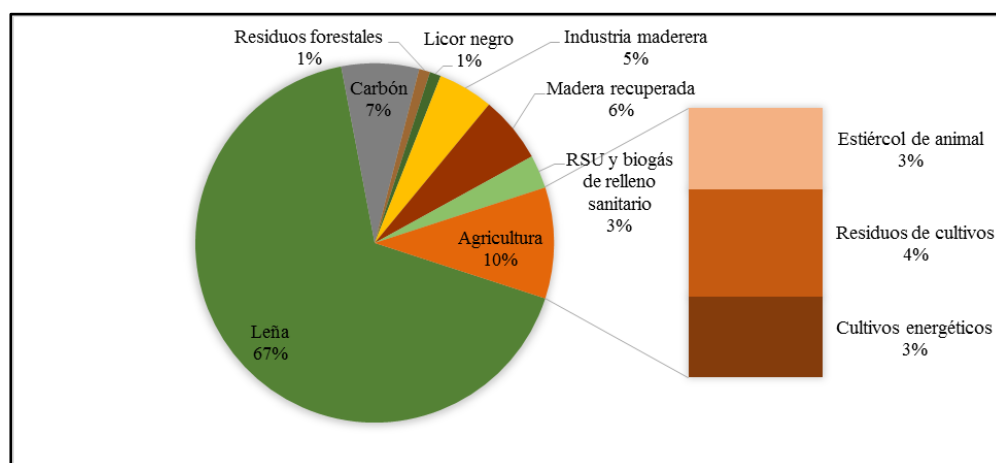


Figura 2 Matriz de biomasa con fines energéticos a nivel mundial.
Fuente: Elaboración propia en base a datos de IPCC (IPCC, 2012).

En Chile se replica la composición de las fuentes de biomasa y destacan el estiércol de ave y cerdo, cultivos energéticos 30% y los residuos provenientes del manejo de bosque nativo (Figura 3; UTFSM, 2008).

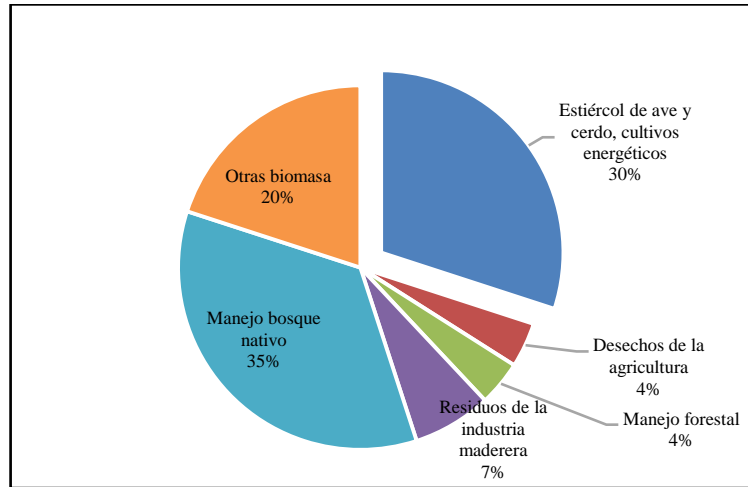


Figura 3 Matriz de biomasa con fines energética en Chile
Fuente: Elaboración propia, en base al potencial bruto de biomasa en Chile. Chamy y Vivanco (2007).

4.2.1 Residuos de cultivos agrícolas

Los residuos agrícolas son la biomasa compuesta principalmente por celulosa y hemicelulosa, formada por moléculas de diversos azúcares fuertemente enlazados y por lignina (Machado, 2010). Estos residuos corresponden a la fracción de biomasa que no es posible comercializar o consumir, puede ser generada durante la producción, transformación o consumo y su eliminación es difícil por su alta dispersión (Machado, 2010).

Los residuos agrícolas pueden clasificarse en tres tipos; los primeros son raíces, hojas o frutos no aprovechables, estos se incorporan al suelo y contribuyen a mejorar sus propiedades físicas y biológicas y, en menor grado, a aumentar su contenido de nutrientes (CONAF, 2008). El segundo grupo corresponde a tallos o, en general, la parte aérea de la planta, la mayor parte son residuos herbáceos y se convierten en subproductos cuando son destinados al consumo del ganado (CONAF, 2008). Por último, los residuos con potencial interés energético, que generalmente son lignocelulósicos, estos suelen quemarse en el mismo lugar donde han sido producidos (CONAF, 2008). A esta categoría corresponden las pajas de los cereales, las cañas de maíz y la poda anual de frutales y viñedos, los cuales en otras épocas eran utilizados como combustible doméstico, pero que hoy constituyen un problema de eliminación. Estos residuos pueden utilizarse como fuente de obtención de

celulosa con lo que se puede generar papel, etanol o biogás, pero en general estos residuos son quemados para evitar problemas de plagas, controlar la maleza y con el fin de reducir el período entre los cultivos sucesivos (CONAF, 2008).

La cantidad de residuos de cultivos producidos en el mundo se estima en 3,758 [MMt año⁻¹], en donde la mayor cantidad proviene de los cereales con un 74%, destacando el arroz, maíz y el trigo (Lal, 2005). Los otros cultivos corresponden a las leguminosas (8%), cultivos oleaginosos (3%), azucareros (10%) y tubérculos (5%). (Lal, 2005). La producción de arroz está liderada por China con un 30% del total y por India con un 22% (Lal, 2005). Estados Unidos es el mayor productor de residuos de maíz, concentra el 31,1% de la producción y la Unión Europea el 19,9% de los residuos del trigo (Lal, 2005).

La disponibilidad real de los residuos en el mundo, considerando rendimiento del cultivo, labranza, y la fracción recogida con otros usos, la magnitud descende a 400 [MMt secas año⁻¹] (Lal, 2005). El rastrojo de maíz, es la mayor fuente disponible de acuerdo a los rendimientos y el manejo pos cosecha, con un 42% del total (Lal, 2005). El poder calorífico de los residuos agrícolas es de alrededor de un 50% el del carbón y un 33% el del diésel, 1 [t] de residuos de cultivos tienen un poder calorífico $18,6 \times 10^9$ J, equivalente dos barriles de diésel (Lal, 2005).

A pesar del alto potencial energético de la biomasa, la tecnología para su aprovechamiento está aún en proceso de desarrollo, la primera planta de escala comercial Abengoa Bioenergy data del 2005 en España, y procesa 70 [t año⁻¹] de residuos de agricultura como paja de trigo y produce 5 MM de etanol al año (IPCC, 2007). Destaca ICM Incorporated en Estados Unidos, por ser la planta con mayor eficiencia energética en su producción de etanol, se abastece de fibra y rastrojo de maíz y sorgo (IPCC, 2007). Pioneros en la producción de etanol en pequeña y mediana escala son Royal Nedalco y la empresa Logen en Canadá, que desde el 2004 comercializa etanol y procesa anualmente 40 [t] de paja de trigo (IPCC, 2007). Se espera que las tecnologías sigan desarrollándose e insertando en las distintas economías para valorizar la utilización de los residuos y superar las barreras tecnológicas y económicas (IPCC, 2007).

La producción de energía a partir de rastrojo de maíz en el mundo es de 90,2 [TWh] concentrándose en Norte América (66%), seguido de Asia y Europa; en África y América Central su generación es nula (IPCC, 2007).

Se estima que en Chile el potencial de residuos de cultivos va desde los 132.174 a los 220.289 [MW] (Gatica y Alonso, 2013), este potencial será aprovechado por tres proyectos energéticos que están aprobados por el SEA, los que se alimentarán de biomasa residual de cereales, que en combinación con otras fuentes de biomasa como la urbana, forestal y agroindustrial, generarán entre 15 a 25 [MW] y estarán emplazados desde la región O'Higgins a La Araucanía (Gatica y Alonso, 2013).

4.2.2 Residuos forestales

Los residuos forestales se refieren a la biomasa leñosa no comercial, como las especies de árboles y residuos de las prácticas de explotación, además, de los residuos forestales procedentes de operaciones industriales, como los residuos de aserradero (serrín y corteza; Petroy, 2012). Estos residuos pueden ser eliminados en el sitio, lo que es muy común en producciones menores, o bien, se pueden utilizar para fines energéticos, produciendo diversos biocombustibles como biogás, carbón vegetal, leña, chips, pellets y briquetas (CONAF, 2008; Pelkonen, 2001).

Algunos países europeos, como Alemania, Reino Unido, Finlandia y Suecia fueron los mayores productores de electricidad generada a partir de biomasa leñosa en 2005 (Pelkonen, 2001). Finlandia, por ejemplo, genera entre el 11 y el 20 % de electricidad con biomasa forestal y ha desarrollado tecnologías basadas en la bioenergía del sector de la industria forestal (Pelkonen, 2001).

La producción de pellets de madera es una alternativa promovida en Europa, con precios competitivos en relación al petróleo, y que permite abastecer plantas de cogeneración industriales y para la calefacción doméstica mediante estufas de doble combustión (Pelkonen, 2001). Suecia, Dinamarca, Alemania e Italia, presentan un alto consumo de pellets con fines energéticos a tal punto que la demanda supera la oferta y deben importar este recurso (Pelkonen, 2001). En Dinamarca, la producción de bioenergía forestal aporta el 34% de la energía de origen renovable, equivalente a 970 [Mt] de petróleo, mientras que en Finlandia el 87% de la energía renovable es de biomasa forestal proveniente de los desechos de la industria (Pelkonen, 2001).

En Chile, los productos forestales y sus derivados son el tercer producto de exportación nacional, lo que implica un elevado volumen de producción y a su vez de desechos (CNE y GTZ, 2007). Las grandes empresas forestales aprovechan sus desechos para autoabastecerse a través de sistemas de cogeneración, empleando la electricidad en el proceso productivo y el calor para el secado (CNE y GTZ, 2007). Pero los productores menores no utilizan este potencial por no contar con la tecnología apropiada, generándose en este segmento una oportunidad de aprovechamiento energético (CNE y GTZ, 2007).

El actual nivel de producción de la industria forestal en Chile cosecha alrededor de 55 [MMha año⁻¹], e interviene con actividades de manejo intermedio, alrededor de unas 30 [MMha año⁻¹] adicionales, explotando en total 85 [MMha año⁻¹], destacando las producciones de pino radiata y eucalipto (CNE y GTZ, 2007). Más del 95% de la materia prima industrial que se procesa en Chile proviene de las plantaciones forestales de especies exóticas, el resto es de bosque nativo, el que aporta mayormente al suministro de leña para usos domiciliario y posee 13 [MMha] (CNE y GTZ, 2007). Los residuos que se generan en el manejo forestal son desechos de podas, de raleos y desechos en la corta final en el caso de las especies plantadas, y sólo los desechos de corta final en el caso del bosque nativo, ya que no hay prácticas silviculturales intermedias para estos bosques (CNE y GTZ, 2007).

La biomasa residual de uso actual está liderada por la leña, que corresponde a 8 [MMt año⁻¹] con uso de calefacción, seguida por los residuos de la industria forestal que están cuantificados en 2,5 [MM t año⁻¹], con fines de cogeneración y secado y el carbón con 0,24 [MMt año⁻¹] (CONAF, 2008).

Se estima que el potencial nacional de generación eléctrica a partir de biomasa residual de plantaciones forestales es entre 310 y 470 [MW], considerando fracciones mínima y máxima de utilización de 50 y 75% respectivamente, este se encuentra concentrado en las regiones del Maule, del Biobío y de la Araucanía, que son aquellas en las que se desarrolla la mayor parte de la industria forestal del país y donde se concentra la mayor cantidad de superficies de plantaciones forestales (CNE y GTZ, 2007).

4.2.3 Estiércol de la actividad ganadera

Este residuo es comúnmente utilizado como abono en tierras de cultivo, aportando nutrientes y estructura, pero al mismo tiempo contamina las aguas subterráneas cuando no es bien tratado previamente a la aplicación (Yakima County Public Works, 2003). Las exigencias ambientales relacionadas con el manejo de olores y de la contaminación, han forzado a optar por nuevas prácticas de gestión de eliminación del estiércol (Yakima County Public Works, 2003). Es así como se ha visto la oportunidad de generar biogás a través de la combustión, digestión anaeróbica y compostaje, aplicando tecnologías que se ajustan al contenido de humedad y de contaminantes del estiércol (Yakima County Public Works, 2003).

En la producción animal se generan dos tipos de estiércol, clasificados de acuerdo a su porcentaje de humedad (Yakima County Public Works, 2003). El estiércol seco posee menos de un 30% de humedad y se produce en los corrales de engorda y de ganado, donde se apila y se deja secar para su retiro anual o semestral (Yakima County Public Works, 2003). El proceso de conversión energética más apropiado es la combustión (Yakima County Public Works, 2003). Si el estiércol tiene más de 30% de humedad se denomina purín y se asocia típicamente a las operaciones lecheras modernas, que limpian los establos en cada ciclo de ordeña diluyendo significativamente los residuos en agua de descarga, dos o tres veces al día, el método más apropiado para la producción de energía es la digestión anaeróbica, obteniéndose biogás como producto (Yakima County Public Works, 2003).

Dinamarca ha sido líder mundial en la digestión anaeróbica centralizada, y otros países europeos han puesto en marcha con éxito esta tecnología, lo que demuestra que la logística de transporte de estiércol puede superarse y que la digestión centralizada es tecnológicamente viable (Yakima County Public Works, 2003).

En Chile, destacan tres grandes sectores productores de estiércol, el avícola, porcino y vacuno (CNE y GTZ, 2007). El estiércol avícola posee un potencial estimado de 157-159 [MW], su producción se concentra entre las regiones de Valparaíso y Libertador General Bernardo O'Higgins (CNE y GTZ, 2007). Su uso es como abono de suelo, requiriendo una

estabilización previa para evitar malos olores (CNE y GTZ, 2007). El estiércol porcino con un potencial estimado de 28-52 [MW], se vislumbra como una fuente con un alza en el potencial dado el alto crecimiento del mercado de las carnes y tiene la ventaja que se presenta en altas concentraciones y su recolección es simple (CNE y GTZ, 2007). El estiércol de porcino ya ha sido utilizado en Chile para la producción de biogás, con la planta pionera en Agrosuper S.A. en el año 2000, realizando la construcción del primer digestor de tratamiento de purines (estiércol diluido en agua) en la localidad de Peralillo (CNE y GTZ, 2007) Actualmente Agrosuper S.A. cuenta con otros cuatro biodigestores operando y siete lagunas aeróbicas, cabe recalcar que el objetivo es el tratamiento de residuos, no la producción de biogás (CNE y GTZ, 2007). Se estima que el estiércol de vacuno tiene un potencial de 6-16 [MW], con mayores posibilidades técnicas de recolección en los sistemas de producción estabulados, en donde la mayor parte del estiércol generado puede ser recuperado luego del lavado de los establos, a diferencia de la producción al aire libre, en el que el estiércol se deja como abono en los campos (CNE y GTZ, 2007). Sólo el 5% de los planteles de vacuno en Chile están estabulados y el 50% está de la zona central, lo que establece una cota máxima para el potencial técnico (CNE y GTZ, 2007).

4.2.4 Cultivos energéticos

Los cultivos energéticos contribuyen actualmente sólo el 0,3% del total de energía mundial producida a partir de biomasa cada año, pero se espera que la proporción crezca en los próximos decenios (IPCC, 2007). El potencial teórico que podría alcanzar esta fuente es de 400 [EJ año⁻¹], considerando la intensificación de la agricultura y el uso de suelos degradados (IPCC, 2007). La ventaja fundamental de los cultivos es la predictibilidad de su disposición y la concentración espacial de la biomasa, lo que da seguridad al suministro energético (IPCC, 2007). Los cultivos pueden ser agrícolas o forestales y se pueden clasificar de acuerdo a su aprovechamiento final en oleaginosos, alcoholígenos y lignocelulósicos (IPCC, 2007).

Los oleaginosos se destinan a la producción de biodiesel siendo los más utilizados la palma aceitera, soya, raps y maravilla, que en conjunto producen el 85% del total global y son la materia prima más importante para su producción (Sims *et al.*, 2006). Los alcoholígenos se utilizan para la producción de bioetanol mediante procesos de fermentación de azúcares obtenida de la caña de azúcar, remolacha, papas y trigo (Sims *et al.*, 2006). Los cultivos lignocelulósicos se destinan a la generación de biomasa sólida como astillas o pellets (Sims *et al.*, 2006).

En EE.UU el 73% de su producción bioenergética proviene de cultivos energéticos y residuos agrícolas, principalmente de maíz, siendo el mayor productor de bioetanol en el mundo (Sims *et al.*, 2006). Suecia ha sido pionera en la utilización de etanol en vehículos Ford, que se han modificado para utilizar biocombustible y gasolina en cualquier proporción (Sims *et al.*, 2006).

La caña de azúcar es producida principalmente en Brasil, China y Tailandia, su relevancia es porque posee la conversión de energía más eficiente de todas las especies herbáceas (FAO, 2008). En Brasil la mitad de la superficie cultivada con esta especie tiene fines energéticos, y se han impulsado medidas para su aprovechamiento como la instalación de motores “flex” en más del 90% sus vehículos, los que pueden funcionar con etanol, gasolina o mezclas (FAO, 2008).

Los cultivos leñosos ocupan una fracción menor dentro de las fuentes de obtención de biocombustibles líquidos, debido a las barreras económicas que se ligan con la baja inserción de las tecnologías, las que actualmente están siendo desarrollada (FAO, 2008). Estas tecnologías se enfocan en la conversión bioquímica y termoquímica (gasificación o pirolisis) (FAO, 2008). Las plantaciones forestales con fines energéticos han sido dedicadas históricamente a la producción de leña con uso local (FAO, 2008). Las especies que podrían tener un alto potencial por su rápido crecimiento son las de zonas templadas como la *Acacia mangium*, *Gmelina arborea*, *Salix*, especies de *Populus* y varios *Eucalyptus* (FAO, 2008). El *Eucalyptus* ha sido producido a gran escala en Brasil, para ser transformado en carbón industrial, con destino a la industria de acero (FAO, 2008). También han desarrollado plantaciones forestales para producir biomasa para la combustión y la generación de calor y electricidad para la alimentación, bebidas y otras industrias, pero en menor medida (FAO, 2008).

En Chile, existe una brecha entre el suelo con capacidad agrícola y el suelo total que podría utilizarse, lo que vislumbra un potencial de generación de bioetanol con especies tradicionales como trigo, maíz, remolacha y arroz (ODEPA, 2011). Las especies que podrían utilizarse para biodiesel son el raps y la maravilla, por poseer una alta adaptación a las condiciones edáficas y climáticas del país. Se encuentran cultivados y adaptados el raps entre las regiones de Valparaíso y de Los Lagos y la maravilla entre las regiones de Valparaíso y del Biobío (Iriarte *et al.*, 2010). La única especie sin fin alimentario cultivada actualmente con potencial de biodiesel es la Jojoba, localizada en la región de Atacama (Paneque *et al.*, 2011). Los cultivos forestales en Chile que podrían tener uso energético exclusivo por su rápido crecimiento y rotación mecanizados de corto periodo son los géneros *Eucalyptus* (*E. globulus*, *E. nitens*, *E. camaldulensis*, *E. denticulada*) y *Acacia* (*A. melanoxylon* y *A. dealbata*; FAO, 2008).

4.3 Tecnologías para el aprovechamiento energético de residuos de cultivos

Los residuos de cultivos se clasifican como biomasa con baja humedad, característica que determina los procesos de conversión necesarios para obtener bioenergía. Estos se pueden dividir en procesos termoquímicos y bioquímicos, los primeros descomponen la biomasa por medio de calor, mientras que el otro lo hace utilizando microorganismo u otros medio de reacción que actúan como catalizadores (UNEP, 2009).

Los procesos de conversión termoquímica de residuos de cultivos son: combustión, gasificación, pirólisis y licuefacción; los bioquímicos son: fermentación y digestión anaeróbica (UNEP, 2009). Las fases intermedias de producción de energía en conjunto con los productos finales, se muestran en la Figura 4.

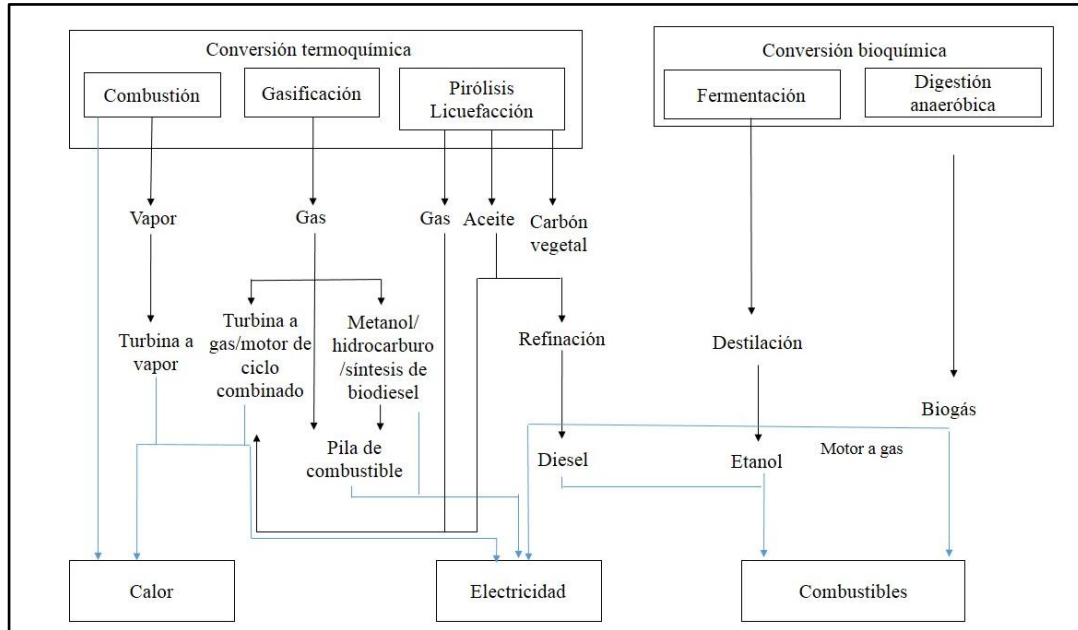


Figura 4 Procesos de conversión de residuos lignocelulósicos a bioenergía.

Fuente: Elaboración propia en base a esquema de conversión de biomasa celulósica de UNEP. (UNEP, 2009)

El estado de desarrollo de las tecnologías es lo que determina la factibilidad de su uso para la obtención de productos objetivos, por ejemplo la combustión que está inserta comercialmente, provee calor en diferentes escalas, que van desde cocinas caseras a sistemas de calefacción urbana, en países nórdicos como Dinamarca y Finlandia, que además de generar calor pueden producir conjuntamente electricidad a través de sistemas de combinación de calor y electricidad (CHP por sus siglas en inglés “Combined heat and power”; Bauen, 2004).

La gasificación se encuentra en estado de demostración, en su primera etapa comercial, tanto la combustión como la gasificación son las tecnologías más apropiadas para la producción de calor y electricidad (Bauen, 2004). La pirólisis presenta gran desarrollo en rubros como la geotermia y la industria alimentaria, sin embargo en el área de la bioenergía aún no alcanza similar desarrollo, pero se espera que pueda alcanzar la madurez que presenta en otros rubros. (Bauen, 2004).

La tecnología de fermentación se encuentra distribuida comercialmente, en mayor medida para la conversión de desechos biomásicos húmedos (Bauen, 2004), sin embargo también se puede aplicar en materia seca como la lignocelulósica (Bauen, 2004).

4.4 Caracterización de los procesos de conversión y su inserción mundial

La biomasa puede ser quemada directamente o convertida en combustibles sólidos, líquidos o gaseosos intermedios. Todos los materiales orgánicos pueden ser convertidos en formas útiles de energía. Los procesos para la conversión de biomasa lignocelulósica a calor y electricidad y su inserción en el mercado se describen a continuación (Fundación Chile, 2008).

1. Combustión

La biomasa se quem quemada directamente o en calderas (Fundación Chile, 2008). La quema de biomasa es la técnica más antigua y extensamente usada en los países en desarrollo para la calefacción (Fundación Chile, 2008), pero su eficiencia es baja bordeando el 5 a 30% (Fundación Chile, 2008). Mientras que en las calderas modernas se puede aumentar la eficiencia hasta un 90%, aprovechando el calor generado y la energía cinética del vapor para producir energía eléctrica (CHP; Fundación Chile, 2008).

Las tecnologías de combustión directa pueden dividirse en lecho fijo, lecho fluidizado y en polvo de combustión (Brown *et al.*, 2007). En la tecnología de lecho fijo la biomasa se quema en una rejilla que se mueve para eliminar las cenizas que se van depositando, los costos de inversión son bajos, pero solo se puede emplear un rango limitado de tipos de biomasa (Brown *et al.*, 2007). En la combustión de polvo, la biomasa en forma de pequeñas partículas se inyecta junto con el aire en la cámara de combustión y la combustión se realiza con la biomasa en suspensión (Brown *et al.*, 2007).

La tecnología de lecho fluidizado es actualmente la más utilizada, con mayor registro de uso en países como Austria, los Países Bajos, Dinamarca, Suecia y Finlandia, debido a su alta eficiencia (Brown *et al.*, 2007). El proceso consiste en quemar la biomasa con una mezcla de agua caliente, material inerte y arena de sílice o dolomita que se encuentra en suspensión constante, gracias a la inyección de un flujo de aire desde la parte baja. (Brown *et al.*, 2007). La suspensión de los materiales permite una mayor transferencia de calor producido, facilitando el control de la temperatura; además el aire se mezcla mejor con la biomasa durante la combustión aumentando el rendimiento y permitiendo utilizar una biomasa menos homogénea (Brown *et al.*, 2007). Estas características la han posicionado en el mercado, principalmente en plantas mayores a 10 [MWe] (Brown *et al.*, 2007).

Existen tecnologías en los sistemas generación distribuida y producción combinada de calor y electricidad (CHP), que utiliza ciclos de Rankine orgánicos, donde se utiliza un fluido orgánico con gran masa molecular, en vez de vapor, para recuperar calor de fuentes de bajas temperaturas, estos alcanzan una eficiencia de 17% y trabajan con potencias de 0,5 a 2,0 [MW] (Fundación Chile, 2008). También los motores de Stirling podrían ser utilizados en CHP de pequeña escala (doméstica), con eficiencias entre el 12-20% (Fundación Chile, 2008). Otra alternativa utilizada es la co-combustión, que consiste en quemar tanto biomasa como combustibles fósiles, la que está siendo empleado en países como EE.UU., Australia,

Finlandia y Alemania (Fundación Chile, 2008). Transversal a todas las técnicas de conversión es el tratamiento previo que debe tener la biomasa, que consiste en la clasificación, trituración, compresión y secado al aire (Fundación Chile, 2008).

2. Gasificación

La gasificación es la oxidación parcial de la biomasa a altas temperaturas (800-1.000°C) en presencia de vapor de agua y aire u oxígeno para formar syngas, una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno principalmente (Brown *et al.*, 2007), el cual se puede utilizar en máquinas térmicas, turbinas de gas o puede ser co-combustionado (Brown *et al.*, 2007). Si el syngas es producido en presencia de oxígeno tiene un poder calorífico mayor que con aire, pero la producción de oxígeno también requiere energía (Brown *et al.*, 2007). Alternativamente, el gas producido puede ser reformulado para producir combustibles como el metanol y el hidrógeno, que podrían ser utilizados en celdas de combustible (Brown *et al.*, 2007). En Filipinas se comercializan la mayor cantidad de gasificadores, pero su utilización es en su mayoría con carbón de leña, astillas de madera y briquetas (Rajvanshi, 1986), también Brasil tiene una alta producción de gasificadores y a la fecha ha instalado 650 unidades, que se alimentan, principalmente, de carbón (Rajvanshi, 1986). Otros países que utilizan esta tecnología son: Estados Unidos, Suecia, Francia, Alemania Occidental y Holanda (Rajvanshi, 1986).

Los sistemas de gasificación, en comparación con los sistemas de combustión, pueden presentar ventajas en términos de economías de escala, limpieza y eficiencia en la operación, y pueden generar 1,4 [GW_{th}] en aplicaciones industriales, térmicas y de co-combustión (Rajvanshi, 1986).

3. Pirolisis

La pirolisis es la descomposición de la biomasa mediante un proceso térmico, en ausencia de oxígeno, dando como resultado carbón vegetal, bioaceites y biogás (Brown *et al.*, 2007). El proceso se desarrolla en tres etapas, en la primera se deshidrata la biomasa entre temperatura ambiente y 180°C, luego ocurre la degradación total de la hemicelulosa y parcialmente de la lignina y la celulosa a 180-290°C, completándose la degradación total de la lignina y la celulosa a 370°C (Machado, 2010). El proceso genera grandes cantidades de alquitrán y de vapores orgánicos (Machado, 2010).

Las proporciones en que se generan carbón vegetal, bioaceites y biogás son controladas por la temperatura del proceso y el tiempo de residencia de los vapores (Machado, 2010). Para maximizar los bioaceites se utilizan temperaturas de alrededor de los 500° C durante un segundo, se denomina este proceso pirolisis rápida y puede ser realizado en diferentes tipos de reactores, siendo el más utilizado el de lecho fluidizado burbujeante (Brown *et al.*, 2007). La fabricación de carbón vegetal se realiza mediante una pirolisis lenta (Machado, 2010). El biogás generado en el lecho fluidizado se usa como suministro energético dentro

de la cadena productiva (Brown *et al.*, 2007). Son los productos líquidos los de mayor interés por ser potencial sustituto o complemento de los combustibles derivados del petróleo (Brown *et al.*, 2007). Actualmente la pirolisis está siendo implementada con mayor extensión en Estados Unidos y Canadá para fines comerciales de productos químicos y combustibles líquidos, mientras que en Europa se ha introducido para la obtención de combustibles líquidos y gas para la producción de energía.

4. Licuefacción

La licuefacción es la obtención de bioaceites a partir de la hidrogenación indirecta de la biomasa, que rompe moléculas complejas de celulosa y lignina, además de remover el oxígeno y adicionar hidrógeno (Moragues, 2003). La licuefacción se realiza en presencia de un catalizador en alta presión (50-200 atm) y temperatura relativamente baja comparadas con la pirolisis (250-450°C; Bauen, 2004). El bioaceite generado, del proceso de licuefacción, tiene menos oxígeno que el derivado de la pirolisis, por lo que tiene mayor poder calorífico (Bauen, 2004). A diferencia de la gasificación, en el proceso de licuefacción, la biomasa no necesita ser secada, por el contrario, se deben adicionar solventes, siendo el más común el agua. (Bauen, 2004). La licuefacción de biomasa por hidrogenación se ha logrado a escala pequeña con residuos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, encontrándose el método todavía en etapa de desarrollo (Moragues, 2003).

5. Fermentación

La fermentación es el proceso biológico mediante el cual micro-organismos como levaduras, hongos o bacterias en ausencia de oxígeno convierten los azúcares como glucosa, fructosas y sacarosas en energía celular, y producen etanol y dióxido de carbono como residuos (FAO, 2008). En escala comercial se produce etanol en Brasil a partir de la fermentación de azúcar, principalmente de caña de azúcar, y en Estados Unidos con la fermentación de almidón, principalmente de maíz (FAO, 2008).

6. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico mediante el cual se degrada la biomasa a gas en la ausencia de oxígeno (Brown *et al.*, 2007). El gas producido (biogás), es una mezcla de CH₄ (60-70%) y CO₂ (30-40%) principalmente (Brown *et al.*, 2007). La digestión anaeróbica se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable y tengan una composición y concentración relativamente estable (Brown *et al.*, 2007). Cuando se añaden residuos agroindustriales a los residuos ganaderos, entonces se denomina co-digestión, su principal ventaja es el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado, además incrementa el potencial de producción de biogás (Angelidaki and Ellegaard, 2003).

La digestión anaeróbica opera en dos fases; en la primera se realiza hidrólisis y acetogénesis, que convierte la materia prima biodegradable en glucosa y aminoácidos, posteriormente convertidos en ácidos grasos (Brown *et al.*, 2007). La segunda fase es la metanogénesis del ácido acético, produciendo también CO₂, ambos pasos se pueden llevar a cabo en un reactor simple (de un paso) o en dos pasos, siendo este último más eficiente, pero costoso y complejo (Brown *et al.*, 2007). Los residuos de la digestión anaeróbica pueden ser utilizados como abono y fertilizante (Brown *et al.*, 2007). Para la producción de electricidad, el biogás se quema normalmente en motores de combustión interna (CI), que pueden incluir la recuperación de calor para la producción combinada de calor y la producción de energía (Brown *et al.*, 2007). El biogás también puede ser quemado en las turbinas de gas y en los sistemas de ciclos combinados para la generación de electricidad (Brown *et al.*, 2007).

La digestión anaeróbica ocurre en el rango óptimo de 35°C (mesofílico) y 50-60°C (termofílico; DGRAG, 2011). En países como China e India se utiliza esta tecnología a pequeña escala en hogares rurales para calefaccionar, iluminar y cocinar (Brown *et al.*, 2007). En el Norte de América y en Europa están operando más de 600 plantas de tratamientos de residuos agrícolas en conjunto con otro tipo de residuos (Brown *et al.*, 2007).

4.5 Biocombustibles derivados a partir de residuos de maíz y trigo

Los biocombustibles corresponden a combustibles derivados de la fracción biodegradable de la biomasa proveniente de los productos, desechos y residuos de la agricultura (de origen vegetal y animal), de la silvicultura y de industrias, de plantas acuáticas y algas, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales (Machado, 2010).

Los biocombustibles se pueden clasificar de acuerdo a la materia prima utilizada y a la tecnología empleada para producirlos (Álvarez, 2009). Debido a los avances en la tecnología, esta clasificación se realiza por generaciones (Machado, 2010). Se consideran los biocombustibles de primera generación los producidos a partir de materias primas agrícolas de uso alimenticios (Álvarez, 2009), los de segunda generación los insumos son residuos agrícolas y forestales compuesto principalmente por celulosa (Álvarez, 2009), los de tercera generación son producidos de los cultivos energéticos (Álvarez, 2009), y los de cuarta generación son producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas (Álvarez, 2009).

Pueden ser sólidos, como la leña, el carbón vegetal y los gránulos de madera; líquidos, como el etanol, el biodiésel y el aceite de pirólisis, o gaseosos, como el biogás (Machado, 2010). Las alternativas existentes y viables actualmente son el biodiesel y el etanol, en

reemplazo o complemento del diésel y gasolina respectivamente, biogás para el gas natural y los biocombustibles sólidos, leña, pellets y briquetas (Paneque, et al. 2011).

El biodiesel se produce a partir de aceites provenientes de diferentes cultivos, principalmente de palma aceitera (33%), soya (28,5%), raps (15,3%) y maravilla (7,9%). El método más común para su obtención es la transesterificación. En el de segunda generación que es donde clasifican los residuos agrícolas se produce a partir de varios procesos termoquímicos siendo el más empleado el de biomasa a líquido (BtL por sus siglas en inglés Biomass to Liquid). Es un proceso que funciona de forma más óptima con biomasa lignocelulósica de baja humedad como lo son los tallos y pajas de trigo y maíz (Machado, 2010). El proceso se inicia con la gasificación de la biomasa, luego se procede a purificar el gas obtenido, eliminando los alquitranes, partículas y gases contaminantes, dando como resultado un “syngas” (hidrógeno y monóxido de carbono). El principal proceso de conversión desde “syngas” a biocombustible líquido es el de “Fischer-Tropsch (Machado, 2010).

La FAO en conjunto con la Universidad de Chile realizó estimaciones sobre el potencial de biodiesel a partir de residuos de la agricultura de trigo, avena, cebada, maíz y arroz. Obtuvieron como resultado un potencial nacional aproximado de 367 [MMI], destacándose como mayor productor a la región de la Araucanía con 53,62 [MMI], siendo el residuo de trigo la principal fuente de biomasa. La producción de biodiesel en Chile se concentra en ocho plantas, las cuales emplean en mayor magnitud aceite de cocina reciclado, otros aceites y grasas recicladas (Paneque *et al.*, 2011). Teóricamente existe un alto potencial de biodiesel de primera generación a partir de raps y maravillas, pues estas se adaptarían a las condiciones climáticas y edáficas de Chile (Iriarte *et al.*, 2010).

El biogás se puede producir mediante distintos tipo de biomasa como residuos agrícolas y forestales, excremento de animales, lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas, entre otros (Chamy y Vivanco, 2007).

Se estima que Chile tiene un potencial factible de producir 400 [MW] de capacidad instalable, equivalente al 3,5% de la capacidad actual del país (Chamy y Vivanco, 2007). La segunda mayor fuente de biogás luego de los purines de cerdo, son los residuos de la agricultura aportando un 20% del potencial total. Actualmente cerca del 80% del biogás producido en instalaciones de mayor tamaño 165 [MMm³] se quema en antorchas sin ser aprovechado como combustible, motivados por la venta de los bonos de carbono y por cumplir la normativa sanitaria y de seguridad. Hasta el año 2010 había más de 20 instalaciones que producen más de 200 [MMm³] anualmente. (Ministerio de Energía, 2011a).

El potencial nacional de biogás a partir de desechos agrícolas (trigo, maíz, papa, raps y remolacha) es de 245.667 [Mm³ biogás año⁻¹], equivalente a 617.161 [MWh/año]. Destaca la región de la Araucanía con el mayor potencial (24,3 % del total), región Del Libertador General Bernardo O’ Higgins (24,2%) y la región del Biobío (22%). (Ministerio de Energía, 2011a).

El bioetanol se puede obtener por medio de la fermentación de la biomasa o de manera sintética a partir del petróleo, el primer proceso es el más usado, obteniéndose un 93% del etanol total por este medio. La producción es a partir de biomasa de cultivos como maíz, caña de azúcar, remolacha, papas y trigo, como también de compuestos lignocelulósicos. Se utiliza actualmente en transporte vehicular, en mezcla directa con gasolinas en diferentes porcentajes y también como aditivo en gasolinas (Paneque *et al.*, 2011).

Los procesos de producción son molienda (obtención de la harina), licuefacción (a partir de la harina y enzimas se obtiene almidón el cual es licuificado), sacarificación (el almidón se convierte en azúcares fermentables), fermentación, destilación, deshidratación (de este proceso se obtiene el etanol) y obtención de coproductos (Paneque *et al.*, 2011).

En Chile la producción de etanol como biocombustible, se encuentra en etapa de investigación, se han determinado que el maíz y el trigo son cultivos que por su adaptabilidad climática pueden ser viables para la producción de etanol (UTFSM, 2007).

En el contexto internacional, Estados Unidos prevé que para el año 2030 reemplazará el 30% de la oferta de petróleo por biocombustibles, para ello utilizará más de mil millones de toneladas de biomasa por año, siendo la principal fuente los residuos de la agricultura (rastros, paja) con un 42% del aporte, que equivale a 430 [MMt año⁻¹] (Brown *et al.*, 2007).

4.6 Caracterización mundial y nacional de los residuos de maíz y trigo

La producción mundial de maíz y trigo constituye el 66% de la producción global de cereales (REF). En el año 2013 se produjeron 874,24 [MMt] de maíz, y 659,28 [MMt] del trigo en el mundo, que sustentaron la industria alimentaria tanto para el consumo humano como de animales (AMIS, 2011). Según proyecciones de la FAO, la producción mundial de cereales aumentará en un 11% entre el 2004 y el 2014, lo que se asocia al aumento en los rendimientos de producción en países que están fuera de la OCDE, y por la expansión de las superficies cultivables de Asia (OCDE y FAO, 2005).

La producción mundial de maíz se concentra en Estados Unidos, China, Brasil y Argentina (AMIS, 2011). Estados Unidos produce el 31% del maíz con un total de 273,83 [MMt] (AMIS, 2011). El trigo presenta una distribución desconcentrada, donde destacan productores de la Unión Europea, China, Estados Unidos, Australia e India (AMIS, 2011). Chile se posiciona en el lugar N° 30 del ranking de productores, con 1,4 [MMt] de trigo al año (AMIS, 2011).

La distribución de los residuos del maíz y del trigo coincide con los lugares de su producción, ya que los residuos se generan *in situ* en el proceso de cosecha. La Figura 5 y Figura 6 muestran la producción de biomasa residual mundial producida al año, tanto de maíz como de trigo (AMIS, 2011). En la Figura 5, destaca Estados Unidos con la mayor

producción de residuos del mundo (547,66 [MMt]; AMIS, 2011), en la Figura 6 se muestran los mayores productores de residuos de trigo que son en conjunto los 28 países de la Unión Europea, con un fracción de un 19,9% correspondiente a 131,1 [MMt] (AMIS, 2011).

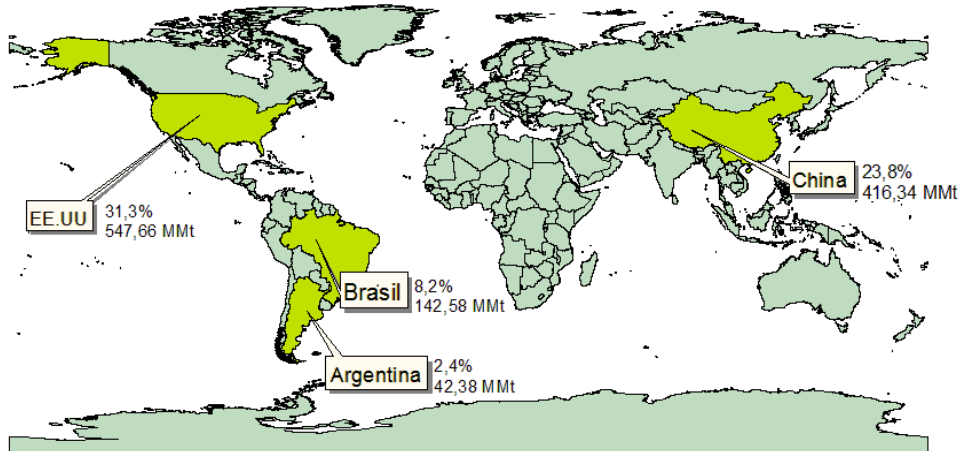


Figura 5 Distribución mundial de la producción de biomasa residual de maíz
Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas en línea de AMIS (AMIS, 2011).

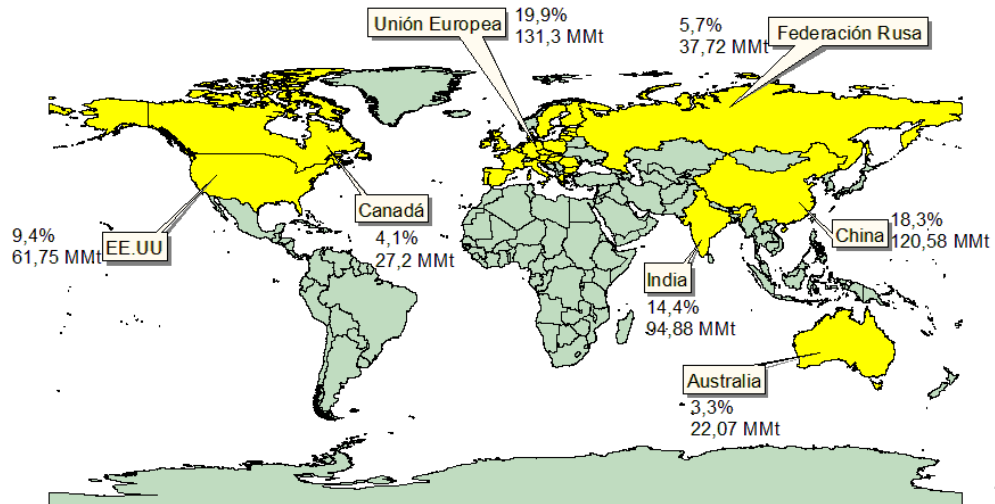


Figura 6 Distribución mundial de la producción de biomasa residual de trigo.
Fuente: elaboración propia en base a estadísticas en línea de AMIS (AMIS, 2011).

4.6.1 Distribución nacional y regional de los residuos

La superficie nacional de cultivos anuales en la temporada 2011/12 fue 689.251 [ha], de las cuales un 79% corresponde a cereal (ODEPA, 2012b), cultivándose en la Región de la Araucanía la mayor superficie de trigo con 115.572 [ha], y la quinta en la producción de maíz con 445 [ha] (ODEPA, 2012b).

En el Cuadro 1 se muestra la variación de superficie, producción y rendimiento a nivel nacional de cereales para los años agrícolas 2000/01 y 2010/01 (ODEPA, 2012b). El trigo registra la mayor contracción de superficie y de producción en contraste con el maíz que fue el que presentó una mayor variación de superficie y destaca por su aumento de producción, los rendimientos en general tienden al alza, de la mano con el avance tecnológico (ODEPA, 2012b).

Cuadro 1 Superficie, producción y rendimiento de cultivos anuales en los años agrícolas 2000/01

(1ª) y 2010/01 (2ª)

Cultivo	Superficie [ha]		Δ (%)	Producción [t]		Δ (%)	Rendimiento [qqm ha ⁻¹]		Δ (%)
	1ª	2ª		1ª	2ª		1ª	2ª	
Trigo	414.000	271.415	-34	1.780.157	1.575.822	-12	43	58,1	35
Avena	89.610	105.643	18	344.527	563.812	64	38	53,4	39
Cebada	15.370	31,3	31	65.454	122.682	87	43	60,8	43
Maíz	82.550	45,1	45	778.498	1.437.561	85	94	120	27

Fuente: Elaboración propia en base a superficie y rendimiento de cultivos anuales de ODEPA (ODEPA, 2012b).

La producción nacional de biomasa residual proveniente de cereales es de 3,6 [MMt], aproximadamente un tercio se produce en la región de la Araucanía (Gatica y Alonso, 2013), lo que se condice con que el trigo es el mayor cultivo nacional en el año agrícola 2010/11 (Gatica y Alonso, 2013). En el Cuadro 2 se muestra disgregada por regiones la producción de biomasa de cereales¹; en base al Censo Agropecuario y Forestal 2007 (Gatica y Alonso, 2013).

Cuadro 2 Producción nacional de biomasa residual de cereales en materia seca [t/año]

Región	Residuos
Valparaíso	26.282
Metropolitana	181.370
Libertador General Bernardo O'Higgins	708.344
Maule	568.790
Biobío	729.729
Araucanía	1.050.038
Los Ríos	169.185
Los Lagos	150.495
Total	3.584.232

Fuente: Elaboración propia en base a Gatica y Alonso (2013).

La extensión de cultivos anuales en Chile, ha disminuido en los últimos diez años en un 17,8% (ODEPA, 2012a). Las mayores disminuciones de superficie cultivada en suelos con

¹ Los cereales del estudio correspondieron a trigo, cebada, avena, centeno, maíz arroz y triticale.

uso agropecuario se han centrado en cultivos de leguminosa con una reducción del 44% y en cereales, especialmente trigo y raps con reducciones del 25% de la superficie.

En tanto, la producción de maíz se ha desplazado al sur del país, generando un aumento de 206% en la región de la Araucanía, pasando de 444 [ha] a 1.360 [ha] (ODEPA, 2012a). El cultivo de maíz se distribuye entre las regiones de Coquimbo y del Biobío, concentrándose la mayor superficie entre la Metropolitana y la del Libertador General Bernardo O'Higgins con un 75% de la superficie total. Mientras que el trigo se distribuye entre Coquimbo de Los Lagos, y la mayor producción está entre la región del Libertador General Bernardo O'Higgins y de Los Lagos (ODEPA, 2012a).

La generación de residuos de maíz es mayor en la región de O'Higgins (Cuadro 3), y a pesar que a nivel nacional es superior la producción de maíz, según el Censo Silvoagropecuario (2007), el trigo genera más biomasa residual por tonelada dada la relación de producción-residuo.

Cuadro 3 Producción y residuos de maíz y trigo a nivel nacional

Región	Maíz [t año ⁻¹]		Trigo [t año ⁻¹]	
	Producción	Residuos	Producción	Residuos
Tarapacá	2	2	2	2
Antofagasta	405	476	31	43
Atacama	864	1.015	272	376
Coquimbo	4.636	5.442	4.899	6.765
Valparaíso	12.180	14.298	8.868	12.247
Libertador General Bernardo O'Higgins	572.226	671.744	27.494	37.967
Maule	280.938	329.797	103.330	142.694
Biobío	111.728	131.159	320.776	442.976
Araucanía	4.019	4.718	453.136	625.759
Los Lagos	0	0	73.936	102.102
Aisén	0	0	79	109
Magallanes y la Antártica Chilena	0	0	0	0
Metropolitana de Santiago	136.072	159.736	17.986	24.838
Los Ríos	0	0	93.758	129.476
Arica y Parinacota	20	24	4	6
Total Nacional	1.123.091	1.318.411	1.104.571	1.525.359

Fuente: Elaboración propia en base a los residuos de Chile descrito por Gatica y Alonso (2013).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de Estudio

La investigación se emplazó en la Región de la Araucanía, ubicada entre 37°35' y los 39°37' de latitud sur y desde los 70° 50' de longitud Oeste hasta el Océano Pacífico, extendiéndose en un área de 31.842,3 [km²] (Figura 7).

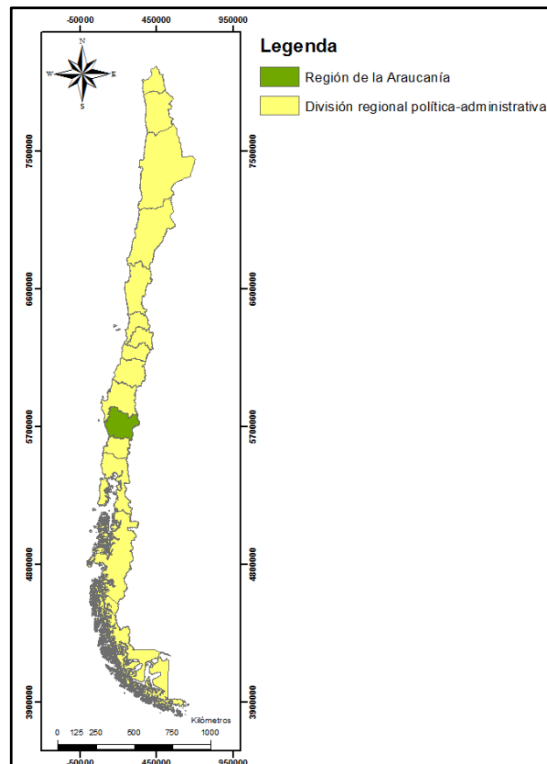


Figura 7 Área de estudio enmarcada en la región de la Araucanía (UTM 19 S, WGS 84)

5.2 Materiales

Para la realización del estudio se utilizó material cartográfico en formato vector correspondiente a la región de Araucanía y fue procesado en el “Software” ArcGIS. Las capas utilizadas fueron las siguientes:

Capas temáticas base, escala 1:250.000 (SIIT, 2013):

- Caminos.
- Ciudades.
- Límites políticos administrativo en escala: nacional, provincial, regional y distrital.
- Red hídrica.

Capas temáticas agroecológicas a una escala de 1:250.000 (MMA, 2013):

- Áreas Protegidas Privadas (APP).
- Áreas Silvestre Protegidas por el Estado (SNASPE).
- Usos de Suelo.

Capas temáticas de infraestructura:

- Centros de salud².
- Establecimientos educacionales².
- Red de distribución eléctrica³.
- Complejos industriales, servicios y centros comerciales (MMA, 2012b).

Capa temática de asentamientos

- Asociaciones de Agua Potable Rural (APR)⁴

5.3 Metodología

5.3.1 Disponibilidad de biomasa residual de maíz y trigo

5.3.1.1 Producción de residuos de maíz y trigo

La estimación de la biomasa residual se realizó mediante los métodos de Relación Residuo-Producto (RRP; Jolli, 2005) y de Coeficiente de Residuos No Utilizados (Jolli, 2005). El método del RRP, se basa en la relación residuo producto del cultivo (Jolli, 2005). El coeficiente de residuos no utilizados se basa en la disponibilidad técnica de los residuos y su producción anual (Jolli, 2005). La data de producción de biomasa de maíz y trigo se tomó de la información espacializada del VII Censo Agropecuario y Forestal, correspondiente a la temporada 2006-2007 (INE, 2007). Los resultados fueron georreferenciados a escala distrital, que corresponde a la escala en que se tomaron los datos en el Censo Agropecuario y Forestal y que otorga mayor detalle espacial (INE, 2007).

Estimación biomasa residual por método la Relación Residuo-Producto

El método RRP corresponde a la relación entre la biomasa no utilizada post cosecha y la biomasa comercializable, por lo que al conocer la magnitud de la producción se puede obtener la biomasa residual escalando este valor por RRP (Jolli, 2005). El valor de RRP se

2 Información solicitada por Ley de Transparencia N° 20.285 a Gobierno Regional de la Araucanía el 11 de noviembre de 2013. Solicitud N° AB085W-0000119.

3 Información solicitada por Ley de Transparencia N° 20.285 a Ministerio de Energía el 16 de diciembre de 2013. Solicitud N° AU002W-0000664.

4 Información solicitada por Ley de Transparencia N° 20.285 a Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), organismo del Ministerio de Obras Públicas, con fecha del 10 de octubre de 2013. Solicitud N° 48073.

deduce del índice de cosecha (IC), que se define como la relación entre el rendimiento económico y la biomasa aérea total (Jolli, 2005). El RRP se calcula como se muestra en la Ecuación 1 (Jolli, 2005).

$$RRP = \frac{1 - IC}{IC}$$

Ecuación 1

Donde;

RRP : Relación residuo-producto
IC : Índice de cosecha (biomasa comercial/biomasa total)

El IC es una magnitud particular para cada cultivo y subespecie, y que además varía según el rendimiento de cada predio, condiciones climáticas entre otras, sin embargo para fines de estimación se deben utilizar valores generales (Jolli, 2005). La oficina estadística Europea “Eurostat’s” establece IC de 0,5 para el maíz y 0,42 para el trigo, valores que no están distante de los nacionales como se muestra en el Cuadro 4 (Jolli, 2005).

Cuadro 4 Índices de cosecha de maíz y trigo

Cultivo	IC
Maíz	0,46
Trigo	0,42

Fuente: Elaboración propia

La biomasa residual se calculó según la Ecuación 2 (Jolli, 2005).

$$Br = P * RRP$$

Ecuación 2

Donde,

Br : Biomasa residual [t año⁻¹]
P : Producción del cultivo [t año⁻¹]
RRP : Relación residuo-producto

Estimación biomasa residual por método de coeficiente de residuos no utilizados

El metodo de coeficiente de residuos no utilizados es la cantidad de biomasa residual obtenida en un año en una hectárea, es un valor estimado, y en general se deriva del factor de disponibilidad y el factor de conversión de biomasa húmeda a seca de cada cultivo (Jolli, 2005). La biomasa residual se obtiene del producto del coeficiente de residuos no utilizado y el área de producción del cultivo, según la Ecuación 3 (Jolli, 2005).

$$Br = Ac * Cr$$

Ecuación 3

Donde,

Br	:	Biomasa residual [t año ⁻¹]
Ac	:	Área cosechada del cultivo [ha]
Cr	:	Coefficiente de residuos no utilizados [t año ⁻¹ ha ⁻¹]

Se utilizó como referencia de coeficiente de residuos no utilizado, los valores reportados por la Comisión de Energía de California (California Energy Comision, 2008). Este organismo internacional considera los factores de conversión de base seca a húmeda, de acuerdo al porcentaje de humedad de la biomasa, además se asume un factor de disponibilidad técnica de 50%, por ser cultivos que generan en su cosecha, paja y pérdidas por manejo (California Energy Comision, 2008). Los coeficientes de referencias fueron validados por la Fundación Chile en su informe: Potencial de Biomasa para Generación de Combustibles Alternativos (Cuadro 5; Fundación Chile, 2008).

Cuadro 5 Coeficientes de residuos no utilizados de maíz y trigo

Tipo de biomasa	Factor de conversión húmeda [t ha ⁻¹]	de base año ⁻¹	Contenido humedad %	Factor de conversión base seca [t año ⁻¹ ha ⁻¹]	Factor de disponibilidad técnica	de Coeficiente de residuo no utilizados
Maíz	11,6		14%	9,98	0,5	4,99
Trigo	4,7		14%	4,02	0,5	2,01

Fuente: Elaboración propia en base a coeficientes de residuos de California Energy Comision (California Energy Comision, 2008)

5.3.1.2 Dispersión espacial de los residuos de maíz y trigo

La biomasa residual distrital estimada por los métodos del RRP y de Coeficientes de residuos no utilizados, se espacializó utilizando ArcGis 9.3 (Herrera-Seara *et al.*, 2010). La información espacializada por método y cultivo, permitió identificar los “hot spot” de biomasa residual y su distribución regional (Herrera-Seara *et al.*, 2010).

5.3.1.3 Variación estacional de residuos de maíz y trigo

La disponibilidad temporal de los residuos está determinada por las temporadas de cosecha de cada cultivo, su distribución espacial (según la región) y las condiciones climáticas y edáficas, donde se desarrollan las especies (CIREN, 1989a). La variación estacional de los residuos se determinó utilizando la ocurrencia de los estados fenológicos de los cultivos agrícolas, las fechas de cosecha de la especie y su respectiva región político-administrativa propuestas por CIREN (CIREN, 1989a; CIREN, 1989b).

5.3.1.4 Uso actual de los residuos de trigo y maíz

El uso actual de los residuos de trigo y maíz se determinó mediante información secundaria utilizando el estudio de “Caracterización de los cultivos y residuos de vegetales derivados de la cosecha de productos forestales y agrícolas en Chile”, elaborado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF; CONAF, 2008).

5.3.2 Estimación de generación eléctrica a partir de los residuos de maíz y trigo

La estimación de la generación eléctrica se realizó a partir de una función de transferencia, que tiene como objetivo estimar cuanta energía se puede producir con la biomasa disponible en la región a escala distrital y cuál es el mínimo de residuo para generar 1[MW]. Se consideró que 1 [MW] es la producción mínima de energía a producir para la factibilidad de instalación de una planta bioenergética (Caputo *et al.*, 2005). El algoritmo (Ecuación 4) tiene como entrada el flujo de biomasa residual anual, y como salida la potencia de energía en [MW] (Caputo *et al.*, 2005). Se aplicó la Ecuación 4 a dos tipos de tecnologías, la primera de combustión con lecho fluidizado y turbina de generación (C/ST) (Caputo *et al.*, 2005) y la segunda a gasificación con lecho fluidizado seguido de un ciclo combinado de gas y vapor (G/CC) (Caputo *et al.*, 2005). En la estimación de generación de energía eléctrica se utilizaron los valores máximos de producción de biomasa residual para determinar cuál es el tamaño más apropiado de planta de generación eléctrica y en base al tamaño de la planta de generación eléctrica, se estimó las producciones de energía de los distritos con mayor biomasa residual (Ecuación 4).

$$WNE = \frac{M * \eta_e * LHV}{3.600 * OH}$$

Ecuación 4

Donde;

WNE	:	Energía neta de salida [MW]
M	:	Biomasa residual [t]
η_e	:	Eficiencia total de la planta
LHV	:	Valor calorífico inferior [kJkg ⁻¹]
OH	:	Horas en que opera la planta [h año ⁻¹]

Los parámetros de la Ecuación 4 son: humedad de biomasa al 30% (valor previo al secado), horas de funcionamiento de la planta de 8.000 al año y valor calorífico inferior 14.630 kJkg⁻¹ (Caputo *et al.*, 2005). Los tamaños de referencia de las plantas de generación eléctrica van entre los 5 a los 50 [MW] (Caputo *et al.*, 2005), para cada tamaño de planta de generación eléctrica y tipo de tecnología de conversión energética se utilizó un valor de eficiencia de conversión específica según se resume en el (Caputo *et al.*, 2005).

Cuadro 6 Eficiencia de plantas de combustión y gasificación

Tamaño de la planta en [MW]	η_e (C/ST)	η_e (G/CC)
5	0,24	0,37
10	0,25	0,39
15	0,26	0,40
20	0,26	0,41
25	0,27	0,43
30	0,27	0,43
35	0,27	0,44
40	0,28	0,44
45	0,29	0,45
50	0,29	0,45

Fuente: Elaboración propia en base a Caputo et al. (2005).

5.3.3 Definición de áreas prioritarias de abastecimiento energético

Las áreas identificadas en el territorio, con prioridad de abastecimiento, se clasificaron según la demanda: actual (alta demanda), potencial y social (Andrade, 2009). La demanda actual aborda la demanda energética de los sectores que poseen un mayor consumo (Andrade, 2009), la demanda potencial considera la demanda energética que existe, y que no está cubierta, es decir, los distritos no electrificados, y la demanda social, hace referencia a la identificación de las áreas donde una planta de bioenergía podría abastecer de forma local las necesidades energéticas de calefacción y electricidad a viviendas y a servicios sociales de uso público (colegios y centros de salud; Andrade *et al.*, 2009).

La localización de las áreas prioritarias de abastecimiento energético según la demanda se realizó mediante el método de EMC (Andrade, 2009), que permite identificar geográficamente las áreas que cumplen con los criterios establecidos por el tomador de decisión (Herrera-Seara *et al.*, 2010). El procedimiento para selección de las áreas de prioritarias de abastecimiento energético consta de etapas consecutivas que se describen a continuación:

5.3.3.1 Definición de criterios de la demanda para definir las áreas prioritarias de abastecimiento energético

Un criterio es la base para una decisión, que puede medirse y evaluarse, este puede ser de dos tipos: factor o limitante. El criterio tipo factor se definirá como el que mejora o reduce la aptitud de una de las alternativas de localización de sitio prioritarios, puede ser de escala continua o discreta y representando un gradiente de aptitud y que en la determinación de la localización óptima se utilizó factores como las áreas prioritarias de consumo, uso de suelo o cobertura, los tipos de caminos y red de distribución eléctrica. Por su parte, el criterio tipo

limitante es aquel que restringen las alternativas, estableciendo parámetros de exclusión (Herrera-Seara *et al.*, 2010).

Para cada una de las demandas clasificadas se establecieron una serie de criterios que corresponden a factores y se describen a continuación:

Demanda actual: es la demanda energética de los sectores que poseen un mayor consumo fueron identificados de acuerdo al sector industrial, y residencial. Los consumidores del sector industrial se representaron a partir de las instalaciones catastradas por el registro de emisiones y transferencia de contaminantes (RETC) del Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2012b), las que se seleccionaron como industriales de acuerdo a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (CIU; Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, 2009). El consumo energético residencial corresponde al gasto de energía eléctrica obtenido de la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN) del año 2006, que consultó a los habitantes sobre su consumo eléctrico en [MW] mensual, la información se promedió a nivel comunal (Ministerio de Desarrollo Social, 2012).

Demanda potencial: corresponde a la demanda eléctrica que existe, pero que no está cubierta y se representó mediante las viviendas no electrificadas (INE, 2002). La información sobre cantidad de viviendas con suministro se obtuvo del Censo 2002, realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), estos datos se convirtieron a porcentaje de viviendas electrificadas por distrito y se clasificaron de acuerdo a su menor magnitud, para representar la demanda que aún no está cubierta por el sistema (Andrade, 2009).

Demanda social: corresponde a la demanda energética (calor y electricidad) de hogares rurales y servicios rurales, referidos a educación municipal rural y a centros de atención primaria de salud rural, que por su magnitud potencialmente pueden cubrirse con CHP de pequeña escala (IEA, 2012b). Se seleccionaron las viviendas rurales por presentar mayor consumo calórico que el sector urbano, además porque la relación calor/electricidad está acorde con el suministro de los sistemas CHP (IEA, 2012b). Los asentamientos rurales corresponden a la clasificación de aldeas definidas por el INE en su informe de “Ciudades, pueblos, aldeas y caseríos” (INE, 2005).

5.3.3.2 Cartografía y normalización de criterios de alta demanda para la identificación de áreas prioritarias de abastecimiento

Todos los valores de los criterios de alta demanda fueron transformados a una misma escala, mediante la asignación de puntajes, de acuerdo a Herrera- Seara *et al.* (2010), en una escala discreta del 1 al 7, siendo 7 el mejor de todos.

En el análisis del sector industrial se consideró la distancia entre cada industria y la planta de generación eléctrica, y la cantidad de instalaciones en cada distrito (Andrade, 2009). Se otorgó un valor de distancia, entre 1 (más lejos) y 7 (más cerca), según la proximidad de la

industria a la planta (Herrera-Seara *et al.*, 2010). Se determinaron rangos equivalentes a partir de la menor y mayor distancia (Cuadro 7). La cantidad de industrias por distrito, también se ponderó con valores entre 1 (menor cantidad) y 7 (mayor cantidad), según se indica en el Cuadro 7.

Cuadro 7 Valor asignado a la distancia desde las industrias y cantidad de industrias

Valor discreto	Valor continuo (Distancia a industrias [m])	Valor continuo Cantidad de industrias
7	0-21.300	7-8
6	21.300-42.600	6
5	42.600-63.900	5
4	63.900-85.201	4
3	85.201-106.501	3
2	106.501-127.801	2
1	127.801-149.101	1

El consumo energético residencial se reclasificó en 7 intervalos, según Andrade y Herrera-Seara *et al.* (2009; 2010). La amplitud de los intervalos se ajustó a la frecuencia de datos, solo un valor está fuera de la tendencia, por lo que el primer intervalo se definió con mayor amplitud (Cuadro 8).

Cuadro 8 Valor asignado al consumo eléctrico

Valor continuo [MW]	Valor discreto
2.000-12.000	7
1.600-2.000	6
1.300-1.600	5
1.000-1.300	4
700-1.000	3
400-700	2
0-400	1

5.3.3.4 Cartografía y normalización de criterios de demanda potencial para la identificación de áreas prioritarias de abastecimiento

La cobertura eléctrica se georreferenció por distrito, y se estableció prioridad a aquellos con cobertura eléctrica menor o igual al 40%, se asignó un valor, en el rango de 1 a 7, siendo 7 el valor de menor cobertura (0-10%) y 1 el valor de mayor cobertura (30-40%), según se resume en el Cuadro 9.

Cuadro 9 Valor asignado a la cobertura eléctrica

Valor continuo (Cobertura %)	Valor discreto
0-10	7
10-20	5
20-30	3
30-40	1

5.3.3.5 Cartografía y normalización de criterios de demanda social para la identificación de áreas prioritarias de abastecimiento

En las capas vectoriales de los centros de salud espacializados, centros educacionales y asentamientos rurales, se establecieron e identificaron como sitios prioritarios los más próximos a los servicios mencionados, de modo de priorizar el abastecimiento local. Luego de determinar la prioridad por proximidad se reclasificaron estos valores de distancia en una escala de 1 a 7, a partir de los valores máximos y mínimos dividiéndolos en 7 clases, siendo 7 la categoría con menores distancias (Cuadro 10).

Cuadro 10 Valor asignado a la distancia a asentamientos rurales

Valor discreto	Distancia a asentamientos rurales [m]	Distancia a centro de salud primaria rural [m]	Distancia a Establecimientos educacionales Municipales rurales [m]
7	0-9.531	0-4.572	0-4.019
6	9.531-19.062	4.572-9.145	4.019-8.038
5	19.062-28.593	9.145-13.717	8.038-12.057
4	28.593-38.124	13.717-18.289	12.057-16.076
3	38.124-47.655	18.289-22.861	16.076-20.095
2	47.655-57.186	22.861-27.434	20.095-24.114
1	57.186-66.717	27.434-32.006	24.114-28.133

5.3.3.6 Ponderación de criterios de identificación de áreas prioritarias de abastecimiento energético de alta demanda, demanda potencial y demanda social.

Se asignan los pesos o ponderación para cada uno de los criterios de identificación de áreas prioritarias de abastecimiento energético por tipo de demanda (Cuadro 11) y se genera una capa vectorial con los sitios prioritarios total asignando igual ponderación a los tipos de demanda.

Cuadro 11 Pesos de los criterios por tipo de demanda

Alta demanda		Demanda potencial		Demanda social	
Criterio	Ponderación	Criterio	Ponderación	Criterio	Ponderación
Distancia a industrias	0,25	Cobertura eléctrica	1	Centros de salud	0,333
Cantidad de industrias	0,25			Establecimientos educacionales	0,333

Alta demanda		Demanda potencial		Demanda social	
Criterio	Ponderación	Criterio	Ponderación	Criterio	Ponderación
Consumo residencial	0,5			Asentamientos rurales	0,333

Luego de obtener los sitios prioritarios de abastecimiento energético de acuerdo a los tipos de demanda, se obtienen los sitios prioritarios totales que resultan de la combinación lineal de los sitios de los tres tipos de demandas, con el fin de integrar las demandas y proponer sitios en donde el abastecimiento podría tener enfoque multipropósito (Cuadro 12).

Cuadro 12 Pesos de los tipos de demanda

Criterio	Peso
Alta demanda	0,333
Demanda potencial	0,333
Demanda social	0,333

En la Figura 8, se resumen los criterios de identificación de sitios prioritarios por tipo de demanda.

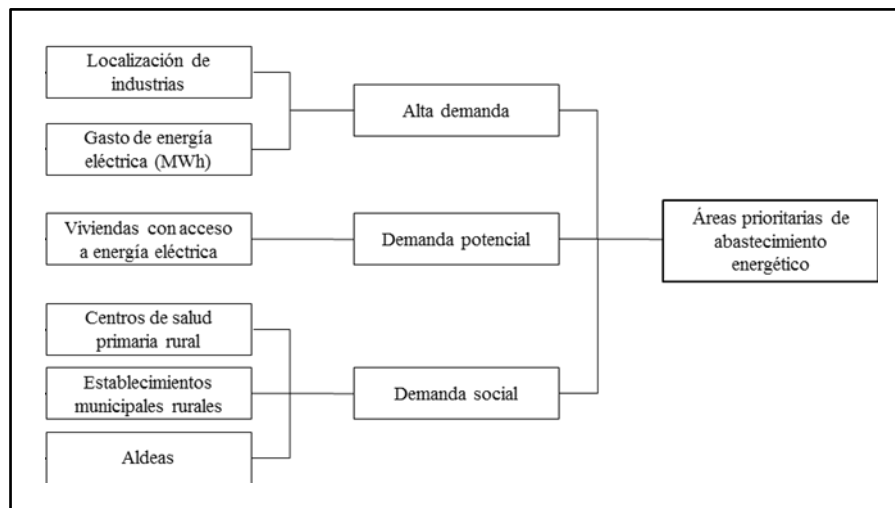


Figura 8 Variables a considerar para el establecimiento de áreas de consumo energético

5.3.4 Procedimiento de propuesta de sitios para el emplazamiento plantas bioenergéticas

La definición de la localización óptima de plantas de bioenergía se realizó a partir de una Evaluación Multicriterio, en el que se incorporó el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés Analytic Hierarchy Process), que resuelve la decisión a través de la comparación por pares de criterios, tomando en cuenta el peso o ponderación relativa asignado por el tomador de decisiones (Herrera-Seara *et al.*, 2010).

5.3.4.2 Definición de criterios para el emplazamiento de plantas bioenergéticas

A continuación, se definen, los criterios agrupados en limitantes y factor:

Selección de Factores

La selección de factores para la localización óptima de plantas bioenergéticas se realizó en base a consideraciones de tipo técnica, social y ambiental, de modo de potenciar los requerimientos sociales energéticos e intervenir de forma mínima en aspectos ambientales, rigiéndose por la factibilidad técnica de la instalación.

- Disponibilidad de biomasa: los distritos con mayor disponibilidad de biomasa se consideran más aptos pero no hay exclusión, estableciendo un gradiente de aptitud. Las magnitudes de biomasa que se utilizó fueron la suma de residuos de trigo y maíz a partir del método RRP.
- Áreas prioritarias de consumo energético: La generación eléctrica debe responder a la demanda por parte de los usuarios y es prioritario que la planta se localice dentro de las áreas prioritarias totales o tipo de demanda de acuerdo a los escenarios de abastecimiento energético que se muestran en el apartado 5.3.4.5.
- Usos de suelo/cobertura: La introducción de un nuevo proyecto energético debe evitar perturbar el estado actual del territorio, por lo que el cambio de uso de suelo debe ser lo menos invasivo o perjudicial para el territorio y las actividades que allí se realicen, por esto es que la localización de las plantas energéticas se orientó a las áreas desprovistas de vegetación, praderas y matorrales y uso de suelo industrial. Por otra parte se trata de evitar la competencia de uso de suelo con las actividades humanas por lo que las áreas agrícolas y urbanas son poco aptas para el objetivo.
- Caminos: Para garantizar la accesibilidad de la planta energética a la red de transporte se estableció una distancia máxima de prioritaria, de 1 [km]. entre la planta y los caminos. El tipo de camino determinó su aptitud en cuanto a accesibilidad, lo que se traduce en eficiencia en los tiempos de viaje.
- Red eléctrica de distribución: La planta de generación energética debe estar próxima a la red eléctrica existente, puesto que una ubicación alejada adiciona gastos de operación que pueden hacer inviable el proyecto. La realización de una nueva línea eléctrica o subestación implica impactos ambientales, que aumentan con la longitud de la conexión eléctrica. Los pequeños generadores de energía (bajo 9 [MW]) que generalmente son energías renovables no convencionales, tienen el derecho a conectarse a la red de distribución directamente (Palma *et.al*, 2009), es por esto que se proponen como prioritaria los sitios más cercanos a la red de distribución con una distancia óptima entre los 0 y 3 [km] (De la Paz, 2013).

Selección de limitantes

La selección se realizó de acuerdo a aspectos restrictivos, en donde una planta de generación eléctrica no puede instalarse por restricciones técnicas o no sería rentable por baja producción de biomasa y a su vez reducida generación de energía.

- Áreas restringidas: se establecen zonas en donde no existe alternativa de instalación, como lo son SNASPE, cuerpos de agua, APP y caminos.

- Disponibilidad de biomasa: los distritos con una biomasa residual mayor a 5.320 [t/año] pueden generar al menos [1 MW] por lo que se consideran aptos para la instalación de una planta con gasificación, por otra parte si se requiere instalar sistema de combustión el mínimo de biomasa es de 8.290 [t/año].

5.3.4.3 Cartografiar criterios

La construcción de la base de datos del SIG, se realiza con las capas temáticas de los criterios establecidos en 5.3.4.2 y se utilizan como insumo las cartografías de biomasa residual elaboradas en 5.3.1.2 y las cartografías de las áreas prioritarias de abastecimiento según demanda energética elaboradas en el apartado 5.3.3. Las capas que están en formato vector se transformaron a “raster”, a una escala de 1:250.000.

- Disponibilidad de biomasa: Se reclasificó la biomasa disponible para obtener sólo los distritos con biomasa residual sobre 5.320 [t año⁻¹] para gasificación y sobre 8.290 [t año⁻¹] para combustión, los píxeles que cumplen con estos criterios de producción, se les asignó un valor de 1 y al resto 0. En los casos que la biomasa se utilizaba como factor esta se reclasificó en intervalos de magnitudes de biomasa equivalentes.

- Usos de suelo/cobertura: En la capa vectorial sobre uso de suelo, se seleccionaron las áreas desprovistas de vegetación, praderas y matorrales, uso industrial, agrícola y urbano, y se reclasificaron de acuerdo a su uso.

- Caminos: En la capa vectorial de caminos se realizó un buffer de 1 [km] a los caminos, que corresponde a la franja de mayor accesibilidad, a este se le asignó un valor de 1.

- Red eléctrica: La planta de biogeneración debe ubicarse próximo a la red de distribución para garantizar la conexión al sistema eléctrico y para reducir los costos de las líneas de conexión. Se estableció un rango prioritario por tramos, donde los tres primeros kilómetros, toman los mayores valores por tramos de 1 [km] (7-5), y luego cada nueve kilómetros se otorgan los valores restantes (4-1).

- Áreas restringidas: Las capas temáticas de SNASPE, APP, red hídrica y caminos se superpusieron, obteniendo como resultado la intersección de ellas, a lo que se le asignó un valor de 0 y a la restante el valor de 1, que es donde se podría instalar una planta.

5.3.4.4 Normalización de criterios

Con el objetivo de convertir todos los valores de los factores a una misma escala, y que posteriormente se puedan comparar, se asignaron puntajes de acuerdo a Herrera-Seara *et al.* (2010) en una escala discreta del 1 al 7, siendo 7 el mejor de todos (Herrera-Seara *et al.*, 2010).

Disponibilidad de biomasa: Cuando se considera la disponibilidad de biomasa como criterio factor, se asigna los valores a su producción según se resumen en el Cuadro 13. Se utilizó la suma de la biomasa residual de maíz y trigo para obtener la disponibilidad total de los residuos lignocelulósicos en estudio.

Cuadro 13 Valores discretos de la biomasa residual

Biomasa residual maíz y trigo	Valor discreto
23.217-27.086	7
19.347-23.217	6
15.478-19.347	5
11.608-15.478	4
7.739-11.608	3
3.869-7.739	2
0-3.869	1

Usos de suelo: Los menores valores se asignarán a los usos de suelo que generan menor impacto en las actividades humanas y al territorio (Cuadro 14).

Cuadro 14 Valores discretos de los usos/coberturas de suelo

Uso/cobertura	Valor discreto
Praderas y matorrales	7
Área urbana e industrial	5
Bosque y renovales	3
Terreno agrícola	1
Plantaciones	1

Áreas prioritarias de consumo energético: Se utilizaron las capas vectoriales obtenidas en el apartado 5.3.3.

- Caminos: Se asignó una puntuación más alta a los caminos de pavimento por favorecer la accesibilidad y el menor puntaje a los caminos de tierras (tiempos de transporte; Cuadro 15).

Cuadro 15 Valores discretos de los tipos de caminos.

Tipo de camino	Valor discreto
Pavimento	7
Ripio	5
Tierra	3

- Red eléctrica de distribución: Se espacializó la red eléctrica por tramos, en donde los tramos más cercanos a la red toman los mayores valores (Cuadro 16).

Cuadro 16 Valores discretos de la distancia a la red de distribución

Distancia a red [m]	Valor discreto
0-1.000	7
1.000-2.000	6
2.000-3.000	5
3.000-12.000	4
12.000-21.000	3
21.000-30.000	2
30.000-39.000	1

5.3.4.5 Elaboración de escenarios para la propuesta de emplazamientos de plantas bioenergéticas

La elaboración de escenarios no es parte del proceso de EMC, pero se realiza con el fin de proponer ejemplos alternativos de localización de plantas bioenergética, que respondan a objetivos específicos como la electrificación rural; y para ello se cambian las ponderaciones de los criterios, de acuerdo a los propósitos y supuestos de cada escenario. Se estableció como supuesto que el suministro de biomasa es decisor en la localización de un proyecto bioenergético, por lo que este criterio se estableció como el de mayor importancia relativa en todos los escenarios. Las áreas prioritarias de consumo se incluyeron de forma fragmentada, por tipo de demanda o área total de acuerdo a la hipótesis del escenario.

En el planteamiento de escenarios se aplicó el método AHP, con el objetivo de comparar los pares de criterios y establecer sus importancias relativas, los puntajes están en una escala continua del 1 al 9, y se presentan en una matriz de preferencia según la importancia relativa que se le otorga (Cuadro 17). Se calcularon los las ponderaciones relativas y la consistencia de ellos, siendo válidos los de ratio menor a 0,1.

Cuadro 17 Escala de posición continua

Importancia relativa	Puntaje
Sumamente	1/9
Muy fuertemente	1/7
Fuertemente	1/5
Moderadamente	1/3
Igualmente	1
Moderadamente	3
Fuertemente	5
Muy fuertemente	7
Sumamente	9

Escenario social

El objetivo del escenario social es satisfacer las demandas energéticas del sector rural, suministrando energía a los servicios básicos como salud y educación, y además al sector rural residencial que consume leña, los sectores industrial y residencial no fueron considerados. Se asumió una demanda latente de los sectores rurales por una energía local y de menor costo, dado que es el sector socioeconómico que gasta la mayor fracción de sus ingresos en energía eléctrica. El uso del suelo y los caminos, tienen una importancia relativa menor a la disponibilidad de biomasa residual y a los sitios prioritarios según demanda. La biomasa residual se incorpora como factor; y la red eléctrica es considerada, pero con un peso relativo menor comparado con los otros criterios, ya que para este escenario es una leve restricción (Cuadro 18).

Cuadro 18 Matriz de preferencia de escenario social

Criterio	Biomasa	Demanda social	Demanda potencial	Usos de suelo	Camino	Red eléctrica
Biomasa	1	3	1/3	5	5	5
Demanda social	1/3	1	1	3	3	3
Demanda potencial	1/3	1	1	3	3	3
Usos de suelo	1/5	1/3	1/3	1	1	1
Caminos	1/5	1/3	1/3	1	1	1
Red eléctrica	1/5	1/3	1/3	1	1	1

Las ponderaciones relativas obtenidas de la matriz de referencia se resumen en el Cuadro 19. La asignación de ponderaciones o pesos fue consistente con un valor de 0.01

Cuadro 19 Pesos relativos de criterios para el escenario social

Peso Relativo	Valor
Biomasa	0,4231
Demanda social	0,1861
Demanda potencial	0.1861
Usos de suelo	0,0682
Caminos	0,0682
Red eléctrica	0,0682

Escenario de factibilidad

El criterio determinante para el emplazamiento de plantas energéticas es la factibilidad técnica de su implementación, por lo que se estableció la biomasa residual como limitante, y se consideró un mínimo de biomasa para la instalación de una planta bioenergética de 1 [MW]. Se estimó que para la generación de 1 [MW] se necesitaban 8.290 [t] de biomasa residual y para gasificación 5.320 [t]. Los caminos, distancia a red eléctrica y los usos son relevantes comparativamente y las áreas de consumo prioritario tienen menor ponderación (Cuadro 20).

Cuadro 20 Matriz de preferencia del escenario de factibilidad

Criterio	Áreas prioritarias total	Usos de suelo	Caminos	Red eléctrica
Áreas prioritarias total	1	1/7	1/7	1/7
Usos de suelo	7	1	1/7	1
Caminos	7	1	1	1
Red eléctrica	7	1	1	1

Los pesos relativos obtenidos de la matriz de referencia (Cuadro 20), se muestran en el Cuadro 21. La asignación de pesos fue consistente con un valor de 0.

Cuadro 21 Pesos relativos de factores en escenario de factibilidad

Peso Relativo	Valor
Prioritarios total	0,0455
Usos de suelo	0,3182
Caminos	0,3182
Red eléctrica	0,3182

Escenario de demanda

El criterio predominante es la satisfacción de la demanda de los consumidores, que corresponde al sector industrial y en menor medida al residencial, los distritos no electrificados no fueron considerados. La red eléctrica tiene el mismo peso que los caminos y el uso de suelo (Cuadro 22).

Cuadro 22 Matriz de preferencia del escenario de demanda

Criterio	Biomasa	Alta demanda	Usos de suelo	Caminos	Red eléctrica
Biomasa	1	3	7	7	7
Alta demanda	1/3	1	7	7	7
Usos de suelo	1/7	1/7	1	7	1
Caminos	1/7	1/7	1	1	1
Red eléctrica	1/7	1/7	1	1	1

Los pesos relativos obtenidos de la matriz de referencia, se muestran en el Cuadro 23. La asignación de pesos fue consistente con un valor de 0.03

Cuadro 23 Pesos relativos de factores del escenario de demanda

Peso Relativo	Valor
Biomasa	0,5125
Alta demanda	0,3214
Usos de suelo	0,0554
Caminos	0,0554
Red eléctrica	0,0554

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Disponibilidad de biomasa residual de trigo y maíz

6.1.1 Producción de residuos de maíz y trigo en la Región de La Araucanía.

La producción de residuos de maíz y trigo se calculó a nivel distrital y los principales resultados se muestran a continuación.

Estimación por método relación residuo-producto

Según el método RRP, en la región de la Araucanía, la producción de biomasa residual de maíz fue de 4,72 [Mt año⁻¹]. De un total de 299 distritos, sólo 11 de ellos superan una producción de 10 [t año⁻¹] y 234 distritos no tuvieron una generación de biomasa residual. La producción de biomasa se concentró en cinco distritos, que en conjunto representan el 95% del total de la biomasa residual regional y corresponden a Roblería, Catripulli, Renaico, Mininco y Huequén (Cuadro 24).

La producción de biomasa residual de trigo, de la región de la Araucanía, según el método RRP, fue superior al de maíz, llegando a 622 [Mt año⁻¹]. A diferencia de lo que ocurre con el maíz, la distribución territorial de la biomasa residual del trigo es heterogénea, con menores niveles de concentración. De los 299 distritos de la región, 23 concentraron el 50% de la producción a nivel regional, mientras que los 10 primeros representan el 27,8% de la biomasa residual. Un total de 37 distritos, no presenta producción de biomasa residual, lo que representa una mayor cobertura productiva, respecto al maíz. Al comparar los valores máximos de biomasa residual se observa que el trigo genera diez veces más biomasa, que el maíz y que para el maíz, sólo el distrito de Roblería, destaca significativamente en su producción de biomasa residual (Cuadro 24).

Cuadro 24 Mayores productores de biomasa residual de maíz y trigo con método de la relación residuo-producto.

Distrito	Biomasa residual de maíz [t año ⁻¹]	Distrito	Biomasa residual de trigo[t año ⁻¹]
Roblería	2.028,6	Quilquén	27.086,3
Catripulli	850,3	Rehuecoyan	19.942,9
Renaico	678,4	La Selva	19.838,5
Mininco	653,3	Parlamento	19.039,2
Huequén	284,1	Quilquilco	16.455,8
General López	35,2	Chufquen	14.759,8
San Patricio	24,2	Santa Ana	14.385,4
Quino	18,8	Manzanaco	14.111,1

Distrito	Biomasa residual de maíz [t año ⁻¹]	Distrito	Biomasa residual de trigo[t año ⁻¹]
Itraque	18,5	Quino	14.049,8
Lolenco	13,0	Coipue	13.378,8
Pueblo Nuevo	10,6		

La producción total de biomasa residual de los cultivos maíz y trigo, para la región de la Araucanía, es de 627,4 [Mt año⁻¹], donde un 99% corresponde a trigo y el 1% a maíz. El aporte de la producción de residuos de maíz es marginal, y las mayores producciones coinciden con la del trigo (Cuadro 24).

Estimación por método de coeficiente de residuos no utilizados

La producción de residuos de maíz, en la región de la Araucanía, según el coeficiente de residuos no utilizados es de 3,462 [Mt año⁻¹]. De un total de 299 distritos, sólo 17, supera las 10 [t año⁻¹] de producción de biomasa residual y 234 distritos tuvieron una producción nula al igual que para el método RRP. El 88% de la producción de biomasa residual corresponde a cinco distritos, los que se nombran Roblería, Catripulli, Mininco Renaico y Huequén (Cuadro 25).

La producción de biomasa residual de la región de la Araucanía de trigo, según el métodos de los coeficientes de residuos no utilizados, es de 190,54 [Mt año⁻¹]. El 50% del total de la producción de biomasa residual, se concentra en 31 distritos. Destacan los distritos de Quilquén, Rehuecoyan, Parlamento y La Selva. Del total de los 299 distritos, solo 37no mostraron producción de biomasa residual, cantidad menor respecto al maíz, y es producto de la mayor superficie cultivada del trigo (Cuadro 25).

Cuadro 25 Mayores productores de biomasa residual de maíz y trigo con método de coeficientes de residuos.

Distrito	Biomasa residual de maíz [t año ⁻¹]	Distrito	Biomasa residual de trigo[t año ⁻¹]
Roblería	2.092,3	Quilquén	7.146,8
Catripulli	312,9	Rehuecoyan	5.050,5
Mininco	299,4	Parlamento	4.751,4
Renaico	219,6	La Selva	4.523,3
Huequén	110,3	Quilquilco	3.880,3
Itraque	49,9	Dollinco	3.714,7
Lealtad	27,9	Quino	3.626,4
San Patricio	27,4	La Colmena	3.616,8
General López	24,0	Colonia Lautaro	3.532,0
Hospital	23,5	Santa Ana	3.530,8

El total de biomasa residual de la región de la Araucanía para los cultivos de trigo y maíz, es 194 [Mt año⁻¹], donde el 98% corresponde a trigo y el 2% corresponde a maíz, similar a las fracciones del método RRP.

La comparación de los valores máximos de producción de residuos de biomasa, muestra que el trigo triplica la producción anual de biomasa de maíz. Los métodos de RRP y de coeficientes de residuos, se plantean como una aproximación al cálculo del volumen de producción de biomasa residual, y su exactitud dependerá de qué tan ajustados estén los factores e índices a las condiciones locales de producción. El método RRP entrega magnitudes totales, seis veces mayores, que el método de coeficiente de residuos. Esta diferencia en el cálculo se debe a que el método de RRP no incluye la disponibilidad de la biomasa, lo que podría reducir sus valores a la mitad y además no aplica la conversión de biomasa húmeda a biomasa seca, lo que reduce la disponibilidad (Jolli, 2005).

Las máximas diferencias de magnitud entre los métodos de RRP y de coeficientes de residuos, se refleja en la producción de biomasa residual de trigo, ya que se obtienen valores en el método RRP, que cuadruplican, a los del método de coeficientes de residuos no utilizados.

El método de coeficiente de residuos considera una magnitud estándar de producción de biomasa residual por cultivo, basándose en un rendimiento genérico que no se ajusta a las condiciones locales y que puede generar resultados que subestiman o sobrestiman la productividad en territorios donde los rendimientos reales son heterógenos como en la Araucanía donde, por ejemplo, el rendimiento de maíz en el distrito de Roblería es de 4,1 [t ha⁻¹] y en Renaico de 13,1 [t ha⁻¹].

Las ventajas de los métodos de RRP y de coeficientes de residuos, radica en que son aproximaciones simples en sus procedimientos y en el cálculo (Jolli, 2005). La estimación por el método RRP es más exacto, por el ajuste a la producción real de los cultivos, mientras que la estimación por el método del coeficiente de residuos es más simple por el hecho de considerar un solo valor de referencia de residuos de biomasa por superficie, y que se puede aplicar a grandes extensiones de territorio, sin necesidad de tener datos de producción.

6.1.2 Dispersión espacial de los residuos de maíz y trigo.

Dispersión por el método de la relación residuo-producto.

La cuantificación de los residuos de maíz, según el método RRP, se concentra en la zona norte de la región de la Araucanía, donde se agrupan cuatro de los cinco distritos con mayor producción, Roblería, Renaico, Mininco y Huequén (Figura 9). Al sur de Temuco se encuentra el distrito de Catripulli (Figura 9). Las mayores producciones están en la depresión intermedia, en los valles de la región de la Araucanía, de forma polarizada, generando dos centros con potencial producción de biomasa residual.

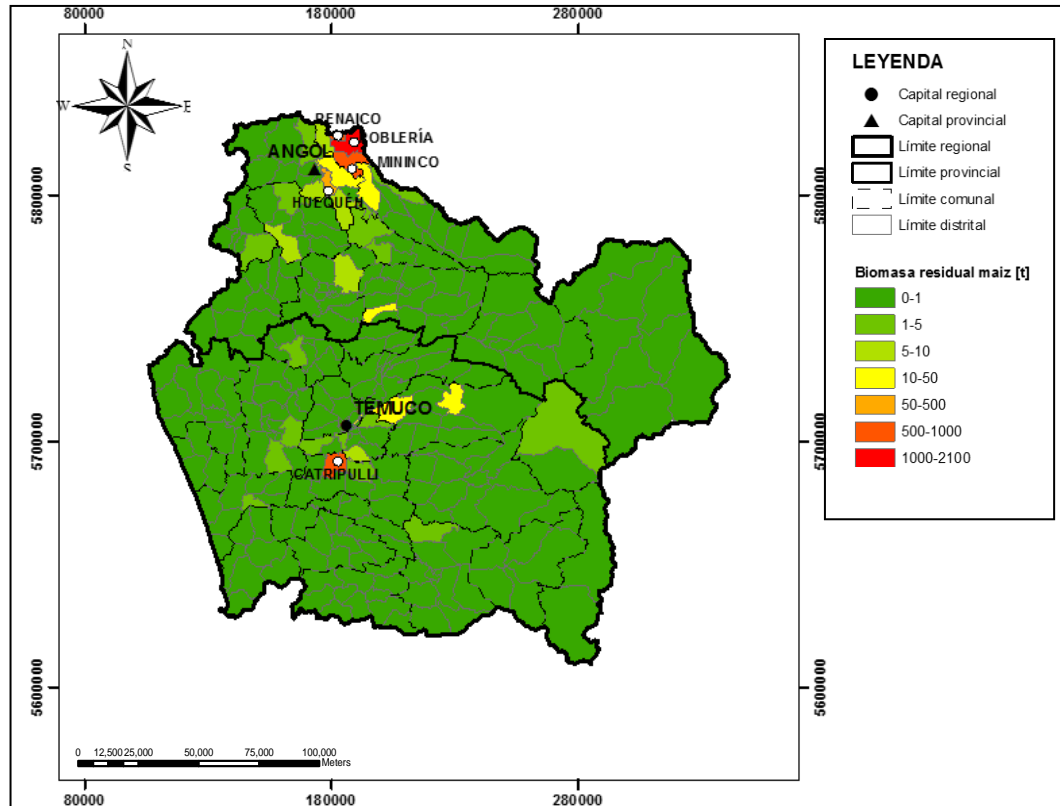


Figura 9 Biomasa residual de maíz según método RRP.

El cálculo de la disponibilidad de biomasa residual de trigo, mediante el método RRP, muestra una concentración de biomasa, en mayor superficie, la que corresponde a la zona céntrica de la depresión intermedia (Figura 10). En esta zona se agrupan los distritos con una disponibilidad de biomasa que está en el intervalo de 10 a 30 [Mt año⁻¹], la superficie total de estos distritos es de 60,8 [Mha año⁻¹]. Se destaca el distrito de Quilquén con una producción mayor a las 20 [Mt año⁻¹], el que se ubica en la Provincia de Malleco, al sur de su capital Angol.

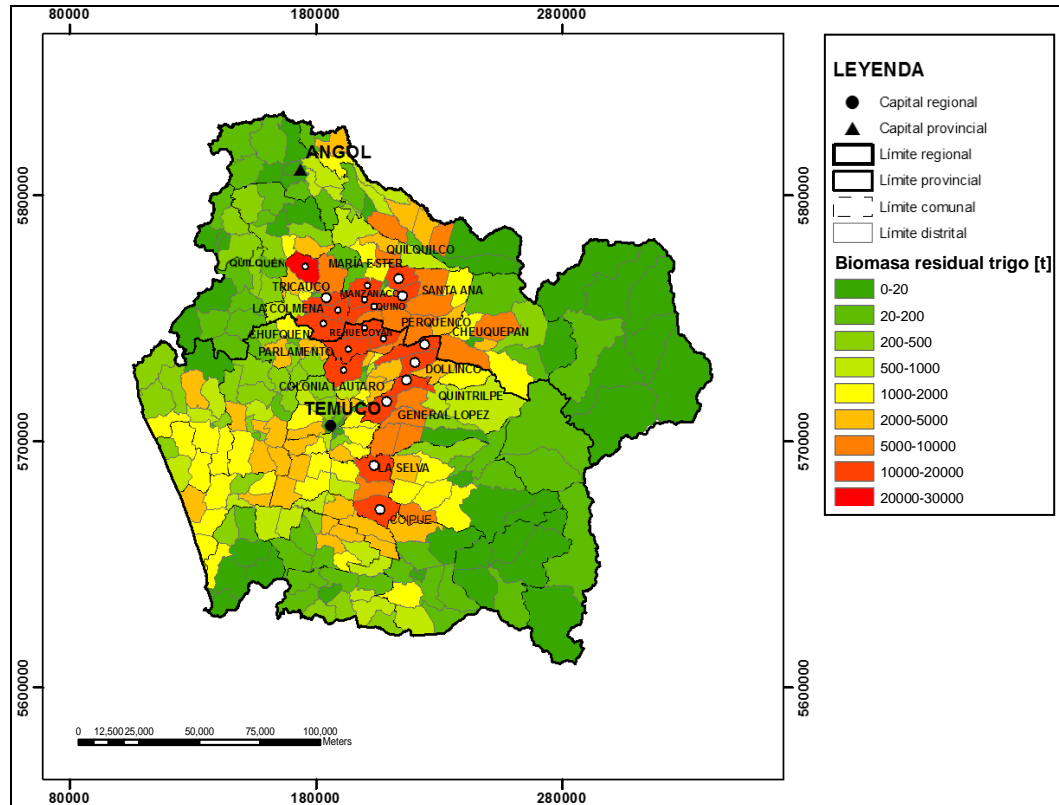


Figura 10 Biomasa residual de trigo según método RRP.

La dispersión de la biomasa residual total, de los cultivos de maíz y trigo, presenta la misma dispersión que la del trigo (Figura 10), lo que se relaciona con que el maíz no tiene relevancia en la modificación de magnitudes. La biomasa residual de ambos cultivos se localizan en la zona intermedia, este resultado es similar al reportado por Gatica y Alonso (2011), los que concluyen que la distribución de los cereales en la región de la Araucanía, se concentra mayormente en torno a Temuco, con más de 100 (Mt año⁻¹) a nivel comunal (Gatica y Alonso, 2013)

Dispersión por método de coeficiente de residuos

La biomasa residual de maíz determinada según el método de coeficiente de residuos, se distribuye de manera similar al del método RRP, concentrándose en el norte de la Región de la Araucanía, en los distritos de Roblería, Renaico, Mininco y Huequén (Figura 11). También se consideran distritos con producciones de biomasa entre 10-50 [t año⁻¹], como Itraque y Lealtad, contiguos al distrito de Huequén; San Patricio y General López, al este de Temuco.

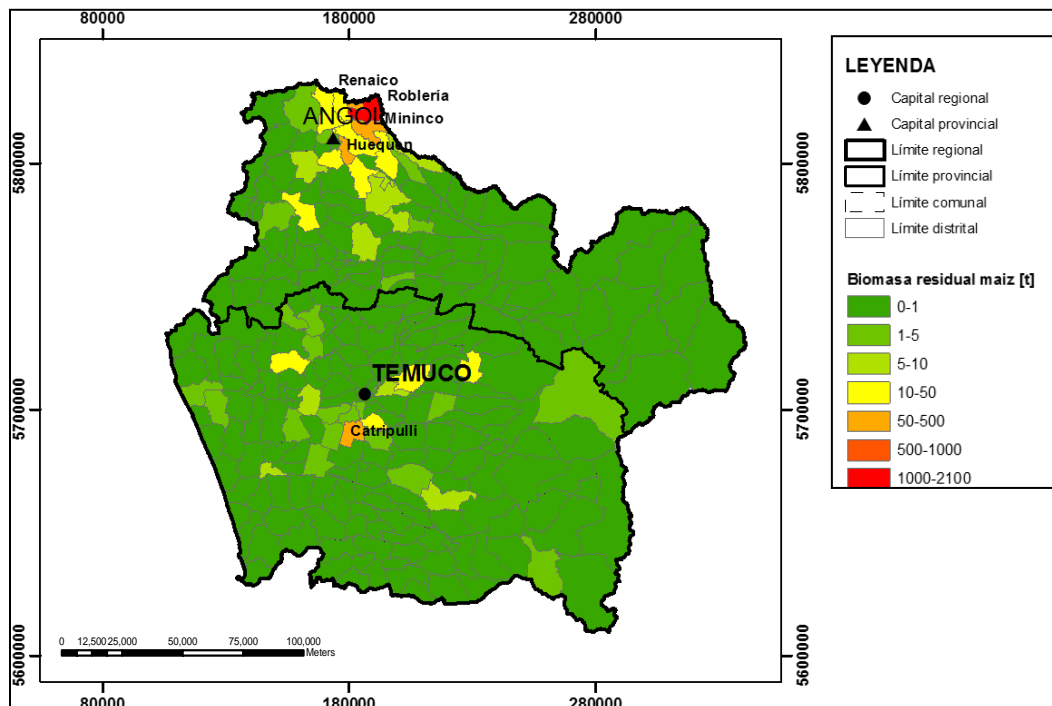


Figura 11 Biomasa residual de maíz según método coeficientes de residuos

La dispersión de la biomasa residual del trigo, se muestra en la Figura 12, y es similar a la distribución resultado de la aplicación del método RRP. La dispersión de la biomasa residual, resultante, se diferencia, de los resultados obtenidos con el método RRP, en las magnitudes que alcanzan las producciones de biomasa. La disponibilidad de biomasa se concentran principalmente en la zona centro de la región de la Araucanía y se destaca el distrito de Quilquén, al sur de Angol, que con una superficie de 277.180 [ha], produce entre 2 y 10 [Mt año⁻¹].

La dispersión de la biomasa residual total, de los cultivos de maíz y trigo, presenta similar dispersión que la del trigo, lo que se condice con que el maíz no tiene mayor relevancia en la modificación de magnitudes (Figura 12).

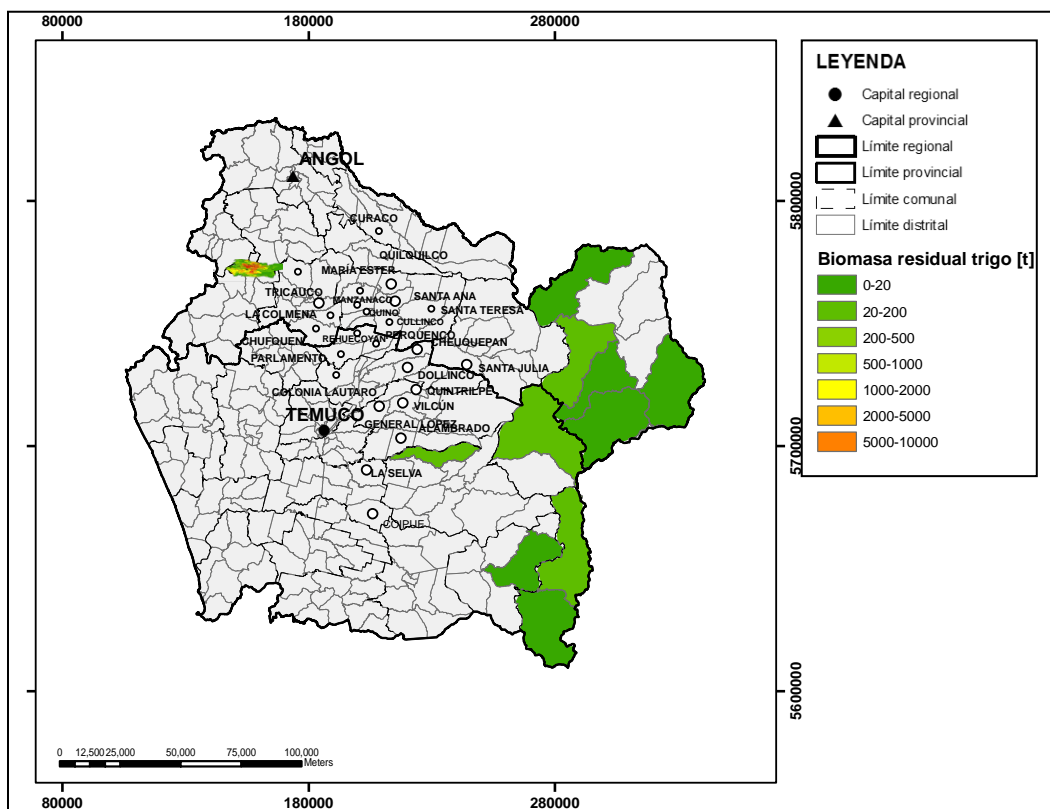


Figura 12 Biomasa residual de trigo según método coeficientes de residuos

6.1.3 Variación estacional de residuos de maíz y trigo en la Región de la Araucanía

La disponibilidad temporal de los residuos de biomasa determina la sostenibilidad de la producción energética durante el año. La generación de los residuos de biomasa es intermitente, y se necesita un suministro constante, por lo que es necesario conocer los ciclos de producción de los cultivos y su posibilidad de almacenamiento. Una alternativa, a considerar, es generar una matriz energética, que considere diversos cultivos, con ciclos de producción desfasados para asegurar una entrada continua de materia prima.

La distribución y disponibilidad, de los residuos de biomasa, está dada por las temporadas de cosechas, que en cultivos anuales, se concentran principalmente entre los meses de diciembre y marzo. En la planificación de la generación energética, se considera como óptimo contar con los datos de medias mensuales de producción de residuos de biomasa., Sin embargo, esta información mensual no está disponible y sólo es posible contar con métricas anuales de producción, en base al Censo Silvoagropecuario 2007 (INE, 2007). Estos datos, se ajustan con las fechas en que se cosechan el trigo y el maíz para la región de la Araucanía, y que corresponden al mes de enero para el trigo (CIREN, 1989a) y a febrero y marzo (dos primeras semanas) para el maíz (CIREN, 1989b; Cuadro 26).

Cuadro 26 Producción media mensual regional

	Producción residuo Enero [t]	Producción residuo Febrero [t]	Producción residuo Marzo [t]
Maíz	0	1.572,77	3.145,53
Trigo	622.015,67	0	0

6.1.4. Uso actual de los residuos de trigo y maíz en la Región de la Araucanía

La eliminación de residuos de biomasa, en lo general, es costosa y también suele utilizarse con fines de enmienda, fertilizante, alimento para animales o energéticos (CONAF, 2008). En los últimos años se ha desarrollado una industria de tableros de fibra de paja, en base a residuos de trigo (CONAF, 2008). También se han desarrollado innovaciones en la producción de papel, utilizando como insumo, los residuos agrícolas lignocelulósicos para generar la pulpa (CONAF, 2008).

Los residuos de los cereales maíz y trigo, generalmente son quemados, lo que genera una pérdida de recursos que podrían ser aprovechados económica o energéticamente, así como también se genera la pérdida de capacidad sumidero de CO₂, un gas con importantes efectos invernadero. (CONAF, 2008). La quema de residuos o rastrojos es cada vez más frecuente, y se estima que alrededor del 50% de la superficie triguera nacional que se maneja con cero labranza, entre las regiones del Biobío y la Araucanía, se realiza quema en la post cosecha, y esto se justifica por las altas cantidades de rastrojos sobre el suelo, lo que genera problemas de plagas y dificulta el control de la maleza, y la reducción del período entre los cultivos sucesivos. Sin embargo, ésta práctica genera externalidades negativas como reducir la materia orgánica del suelo, contribuir a la degradación y pérdida de las propiedades físicas del recurso (Silva *et al.*, 2011).

Los residuos de biomasa del cultivo de maíz, corresponden al 44% de su cosecha total, y son estructuras de la planta, tales como caña, hojas, limbos, coronta y otras (Gatica y Alonso, 2013). Mientras que en el trigo, la biomasa residual, es el 48% de su cosecha total (Gatica y Alonso, 2013). En base a información secundaria disponible, puede afirmarse, que teóricamente existe biomasa disponible. Sin embargo, no se tiene certeza del uso de la biomasa generada, y la disponibilidad para utilizarse en generación de energía. Tampoco se tiene certeza de la relación entre los residuos y la biomasa comercial, y sólo en la industria azucarera se conoce esta relación, dado que la biomasa que queda post cosecha tiene un valor comercial (Gatica y Alonso, 2013). La falta de precisión, en la disponibilidad de biomasa, se asocia a la dispersión de los residuos de biomasa, su estacionalidad y diferencia en las condiciones locales de producción (Jolli, 2005).

6.2 Estimación de generación eléctrica a partir de los residuos de maíz y trigo con combustión y gasificación.

La máxima generación eléctrica que se puede obtener en la región de la Araucanía, se estimó considerando como referencia, el distrito con la mayor producción conjunta (trigo y maíz) de biomasa, y que corresponde al distrito de Quilquén. En base a una entrada de 27.086 [t año⁻¹] se calculó la energía que se puede obtener de acuerdo a las distintas potencias de las plantas y sus respectivas eficiencias (Cuadro 27).

Cuadro 27 Generación de energía en Quilquén

Tamaño de planta	Gasificación [MW]	Combustión [MW]
5	5.1	3.3
10	5.4	3.4
15	5.5	3.5
20	5.7	3.6
25	5.8	3.6
30	5.9	3.7
35	6.0	3.7
40	6.0	3.9
45	6.1	3.9
50	6.2	4.0

Una planta de 5 [MW] es la que mejor se ajusta a la generación de energía eléctrica, por lo que se eligió, y definió esta dimensión de planta, para el modelamiento y calculo de cual es la producción que se puede obtener en la región de la Araucanía por distrito. Los resultados más altos de producción eléctrica se muestran la Figura 13; donde se relaciona la biomasa, del segmento con mayor producción, con la potencia generada para la tecnología de combustión y gasificación.

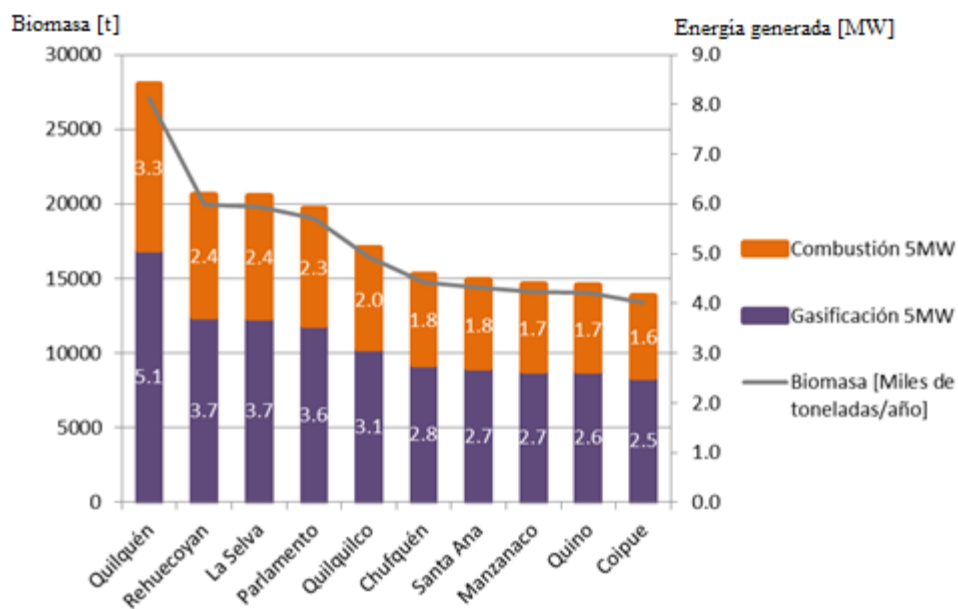


Figura 13 Producción de energía según el tipo de tecnología y magnitud de biomasa.

Se estimó el volumen de biomasa mínimo para generar 1[MW] de energía, en una planta de 5[MW], mediante combustión o gasificación. Se estimó e identificó los distritos con mejor potencial de producción de biomasa, y de propiedades que permitan la factibilidad técnica y rentabilidad, en la producción de energía.

La biomasa mínima para generar 1 [MW] de energía, con sistemas de combustión es de 8,29 [Mt año⁻¹]. Este volumen mínimo de biomasa residual, esta disponible en 22 distritos de los 299, de la región de la Araucanía, y equivalen al 7,35% del total. El volumen de biomasa mínima para generar 1 [MW] de energía, con sistemas de gasificación, es de 5,32 [Mt año⁻¹], un volumen inferior al que demanda una planta de combustión, por ser un sistema más eficiente (Rajvanshi, 1986). Este volumen mínimo de biomasa residual, esta disponible en 36 distritos, y equivalen a un 12% del total.

Los resultados indican que potencialmente es factible la generación de energía en los distritos de Quilquén, Rehuecoyan, La Selva, Parlamento y Quilquilco. Estos distritos se encuentran contiguos espacialmente, y muestran un potencial de generación de energía, lo que permite planificar la producción de biomasa y desarrollar un “cluster” productivo.

6.3 Áreas prioritarias de abastecimiento energético en la Región de la Araucanía

6.3.1 Definición de áreas para alta demanda

De acuerdo a los criterios establecidos en el apartado 5.3.4, se definieron las áreas prioritarias de alta demanda, demanda potencial, demanda social, y demanda total, que

considera todas las anteriores. Las áreas prioritarias de alta demanda se seleccionaron de acuerdo a la cantidad de industrias por distritos. Estas áreas se concentran, principalmente, en tres puntos de la comuna de Temuco (Figura 14). Se consideró la cantidad de industrias y la distancia desde las industrias (Figura 23 y Figura 24) y el consumo energético comunal (Figura 25), los mayores valores de consumo energético se registraron en las comunas de Temuco, Carehue y Cunco. La información fue ponderada y permitió generar la cartografía de alta demanda (Figura 26). De la cartografía de alta demanda se seleccionaron los sitios con mayor valor en la combinación lineal de las tres capas (Figura 23, Figura 24 y Figura 25) correspondiente a los valores 5,6 y 7, de lo que se obtienen las comunas prioritarias de alta demandas que son: Cunco, Carehue y Temuco (Figura 14).

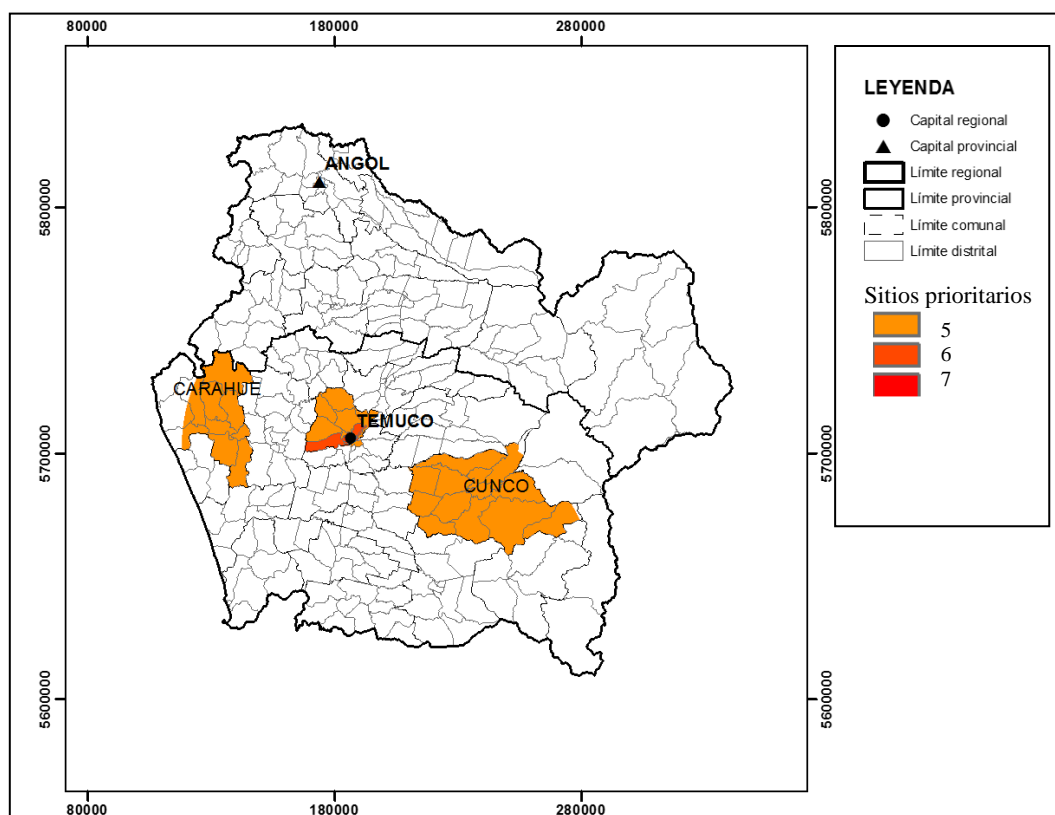


Figura 14 Sitios prioritarios de alta demanda

6.3.2 Definición de áreas para demanda potencial

Las áreas de demanda potencial se definieron, de acuerdo a la descripción del apartado 5.3.3.1, y se consideró la cobertura eléctrica (Figura 27). Los distritos seleccionados por su baja cobertura eléctrica corresponden a los valores 3, 5 y 7, los que representan a los distritos con menos del 40% de cobertura eléctrica (Figura 15). Los distritos seleccionados de demanda potencial, por su baja electrificación, se distribuyen en las zonas más periféricas de la región de la Araucanía, y esta asociado a la ruralidad, estos constituyen una superficie de 613.801 [ha], lo que representa el 9% de la Región de la Araucanía.

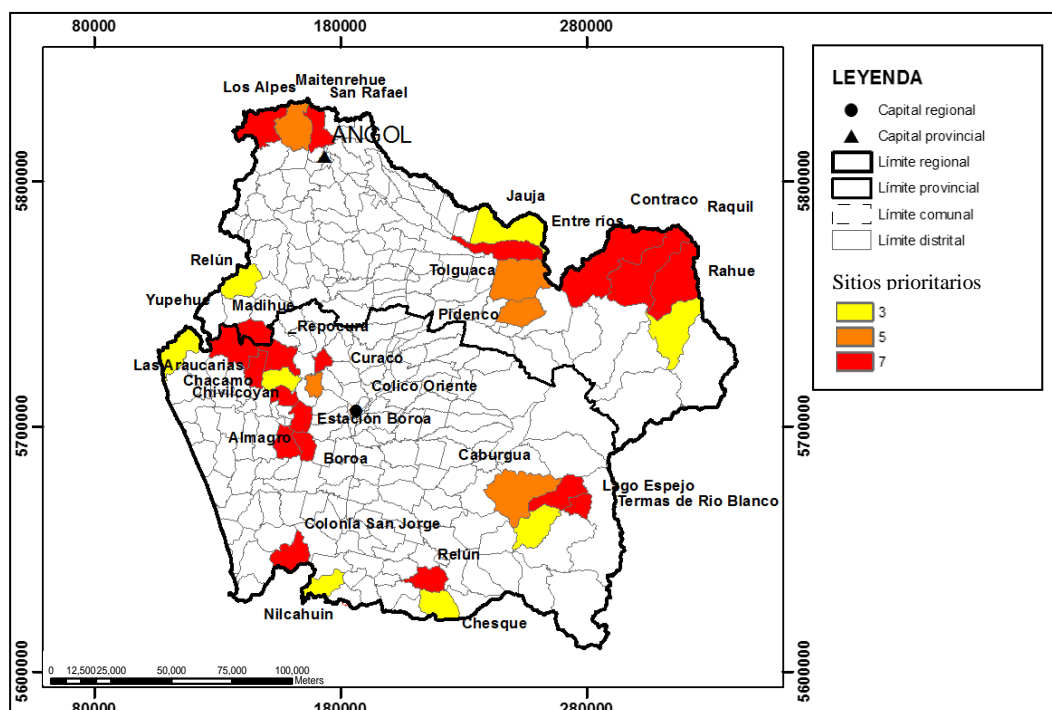


Figura 15 Sitios prioritarios de demanda potencial (baja electrificación)

6.3.3 Definición de áreas para la demanda social

Las áreas de demanda social se definieron de acuerdo al apartado 5.3.3.1, y consideró la demanda de los servicios de salud, educación y consumidores de leña. La demanda se representó por aldeas, o asentamientos rurales. La cartografía de las distancias desde los centros de salud se muestra en la Figura 28, se seleccionó el rango de mayor valor, es decir la franja más cercana a los centros de salud, para darle prioridad a una ubicación de la planta más próxima. Los establecimientos educacionales rurales se concentran en la zona centro de la región de la Araucanía (Figura 29). Además se consideró la distancia desde las localidades consumidoras de leña, los que se concentran en la zona centro-oeste de la región (Figura 30). La información georeferenciada de los centros de salud (Figura 28), establecimientos educacionales (Figura 29) y consumidores de leña (Figura 30), definió el área de demanda social (Figura 31). Se seleccionan los sitios, con el mayor puntaje ponderado de la combinación lineal de las Figura 28, Figura 29 y Figura 30 (Figura 16), de lo que se obtienen las zonas prioritarias de demanda social, que se distribuyen como cluster aldedor de las provincias de Temuco y Angol.

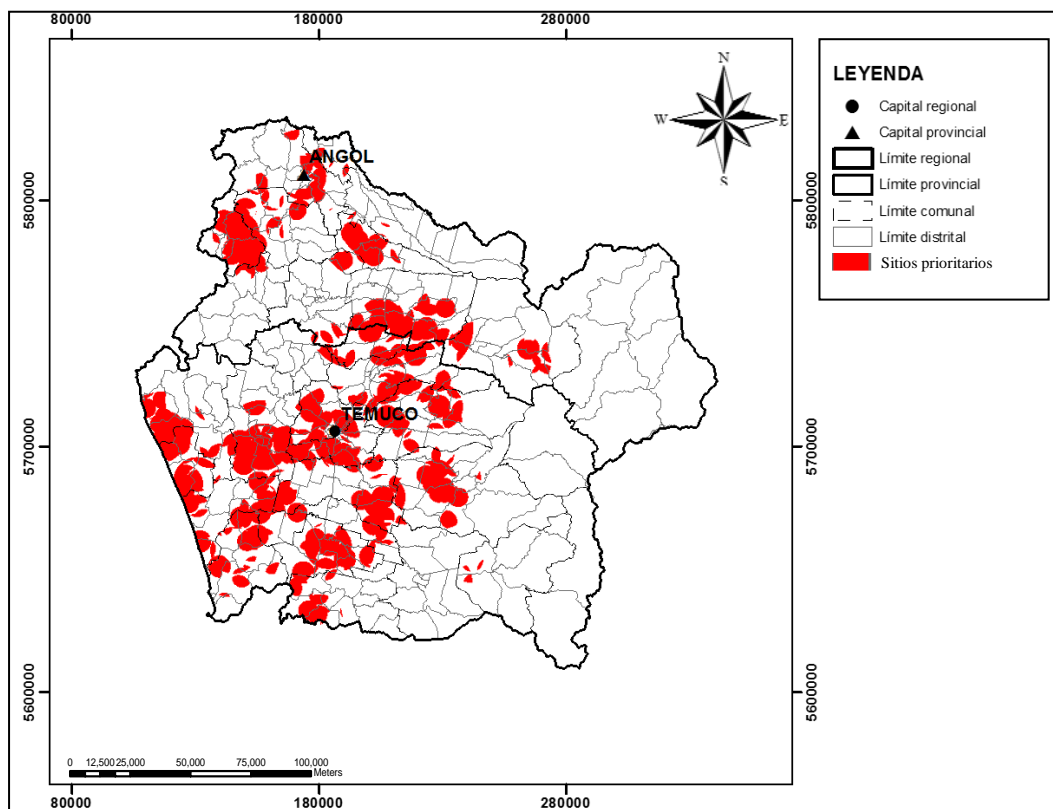


Figura 16 Sitios prioritarios demanda social.

El análisis de los resultados obtenidos de la definición de las áreas de alta demanda, demanda potencial, y demanda social, permitió definir la demanda total de la región de la Araucanía, mediante la combinación lineal de los sitios prioritarios de abastecimiento energético. Estos sitios se distribuyeron de forma heterogénea en la cuenca, lo que responde a la combinación de criterios con distintos patrones de distribución. Los sitios seleccionados, representan una superficie de 458,8 [Mha], que corresponde a un 14% del área de la región de la Araucanía y los distritos con mayor representación son Los Alpes, San Rafael, Entre Ríos, Contraco, Ranquil (Figura 17).

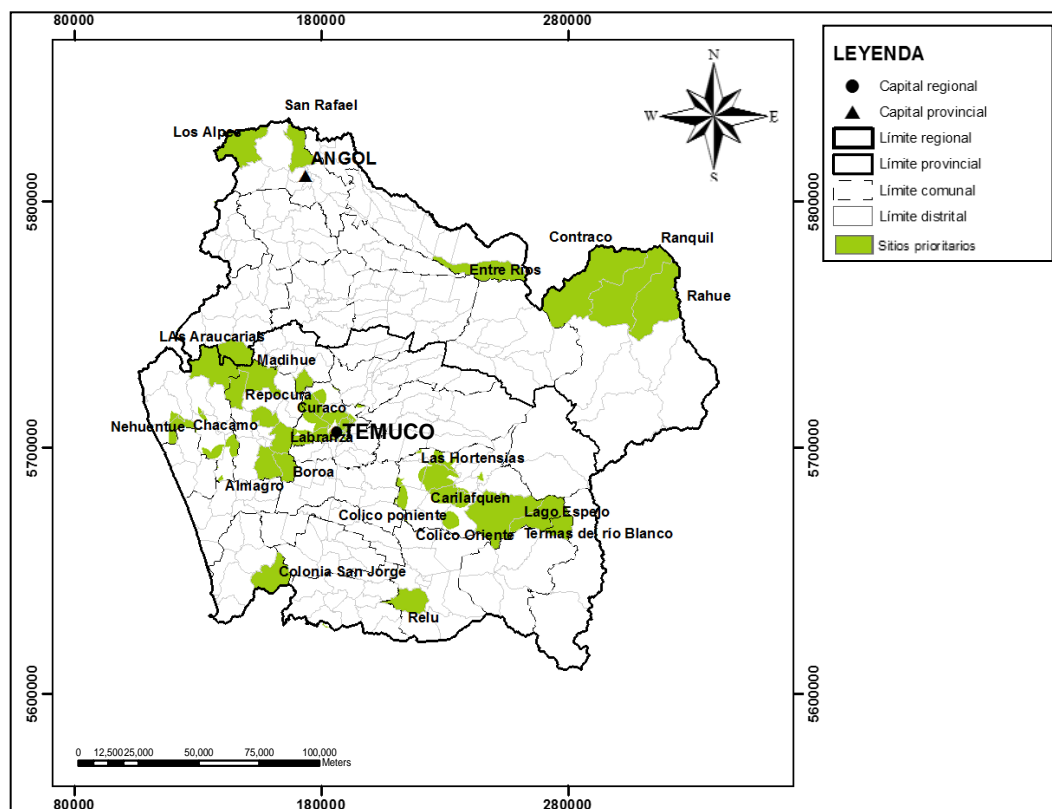


Figura 17 Sitios prioritarios totales.

6.4 Propuesta de sitios prioritarios para el emplazamiento de planta bioenergéticas

La propuesta de sitios prioritarios para el emplazamiento de planta bioenergéticas se construyó a partir de la selección de factores y limitantes, según se describió en el apartado 5.3.4.2. Los factores y limitantes, fueron cartografiados y normalizados, en una misma escala, como criterio base de comparación.

6.4.1 Cartografías de factores y limitantes para la elaboración de escenarios

Los factores desarrollados fueron biomasa residual de trigo y el de maíz, de acuerdo al método RRP, uso de suelo, caminos, y red eléctrica.

El factor de biomasa residual de trigo y el de maíz, de acuerdo al método RRP (Figura 32). La disponibilidad de biomasa residual de trigo y maíz, tiene un patrón de distribución concentrado en la zona centro de la región de la Araucanía, con valores máximos de biomasa residual para los distritos de Quilquén, la Selva y Rehuecoyán.

El uso de suelos se presenta en la Figura 33, los valores más altos representan los suelos con mejor aptitud para la instalación de una planta, como padreras y matorrales y área urbana e industrial. Los caminos (Figura 34) óptimos para el transporte de biomasa y el acceso a la planta bioenergética son los de pavimento, los que cruzan la región de forma vertical y se diversifican levemente hacia los costados, menos óptimos, pero más densos son los caminos de ripio y los de tierra, los que se distribuyen hacia la periferia y son menos numerosos (CONICYT, 2010). La red de distribución se concentra en la zona centro y oeste de la región de la Araucanía, que es donde se localizan los asentamientos (Figura 35).

Las limitantes cartografiadas fueron los distritos con biomasa superior a $5.320 \text{ [t año}^{-1}\text{]}$ (biomasa mínima para generar 1[MW] con gasificación) los que se agrupan en la zona centro cercana a la comuna de Temuco (Figura 36). La distribución espacial de los distritos con biomasa superior a $8.290 \text{ [t año}^{-1}\text{]}$ es similar a la de biomasa superior a $5.320 \text{ [t año}^{-1}\text{]}$, pero su extensión de área es menor, ya que son menos los distritos que cumplen con la condición de producir biomasa superior a $8.290 \text{ [t año}^{-1}\text{]}$ (Figura 37). Además, se obtuvieron las zonas de restricción, a partir del SNASPE, APP, caminos y red hídrica, dando como resultado las áreas con restricción a la instalación de una planta bioenergética (Figura 38)

6.4.2 Propuesta de sitios para emplazamiento de plantas bioenergéticas según Escenario Social.

Los sitios para el emplazamiento de plantas bioenergéticas según el Escenario Social, fueron definidos según la EMC, y se consideró como factores la biomasa residual, la demanda social, demanda potencial, uso de suelo, caminos y red eléctrica; y se consideró como limitante las zonas de restricción. Del resultado de la EMC se eligieron los valores 3 y 4 que corresponden a los más altos y mejores alternativas para el establecimiento de una planta de bioenergía en el escenario social, (Figura 18), que corresponde a una superficie de 201.951 [ha], correspondiente al 6,3% de la superficie de la región de la Araucanía.

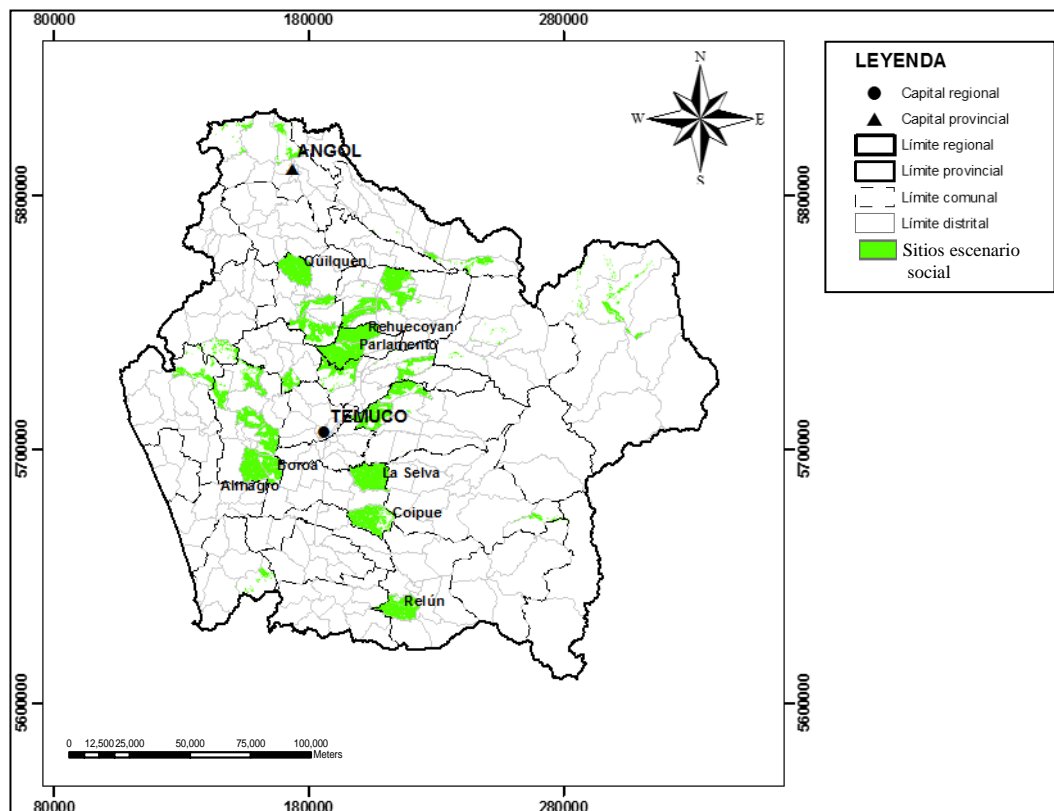


Figura 18 Localización de plantas bioenergéticas en escenario social.

6.4.3 Propuesta de sitios para emplazamiento de plantas bioenergéticas según escenario de factibilidad.

Los sitios para emplazamiento de plantas bioenergéticas según el escenario de factibilidad permitió definir dos alternativas de tecnología de plantas bioenergética, de acuerdo al consumo de materia prima, una alternativa considera plantas para gasificación (Caputo *et al.*, 2005) y otra para combustión (Caputo *et al.*, 2005). La definición del tipo de plantas bioenergética se definió de acuerdo a las condiciones de biomasa mínima que se genera por distrito para cada tecnología, según se describe en el apartado 6.2.

A partir de la cartografía de producción de biomasa residual (Figura 32) se seleccionaron los distritos que producen más de 5.320 [t año⁻¹] y 8.290 [t año⁻¹], que corresponde a la biomasa mínima para producir 1 [MW] de energía eléctrica mediante gasificación y combustión, respectivamente.

En ambas alternativas de generación de energía se utilizaron los mismos factores, que corresponden a áreas prioritarias de abastecimiento energético, uso de suelo, caminos y red eléctrica, según lo descrito en apartado 5.3.4.5. Se consideraron como limitante las zonas de restricción, según lo descrito en apartado 5.3.4.5. La combinación lineal de los factores permitió obtener los sitios que mejor reponden al escenario de factibilidad técnica (Figura

19 y Figura 20). Los sitios óptimos del escenario de factibilidad utilizando tecnología de gasificación tienen una extensión de 54.795 [ha], y para la de combustión de 41.949 [ha].

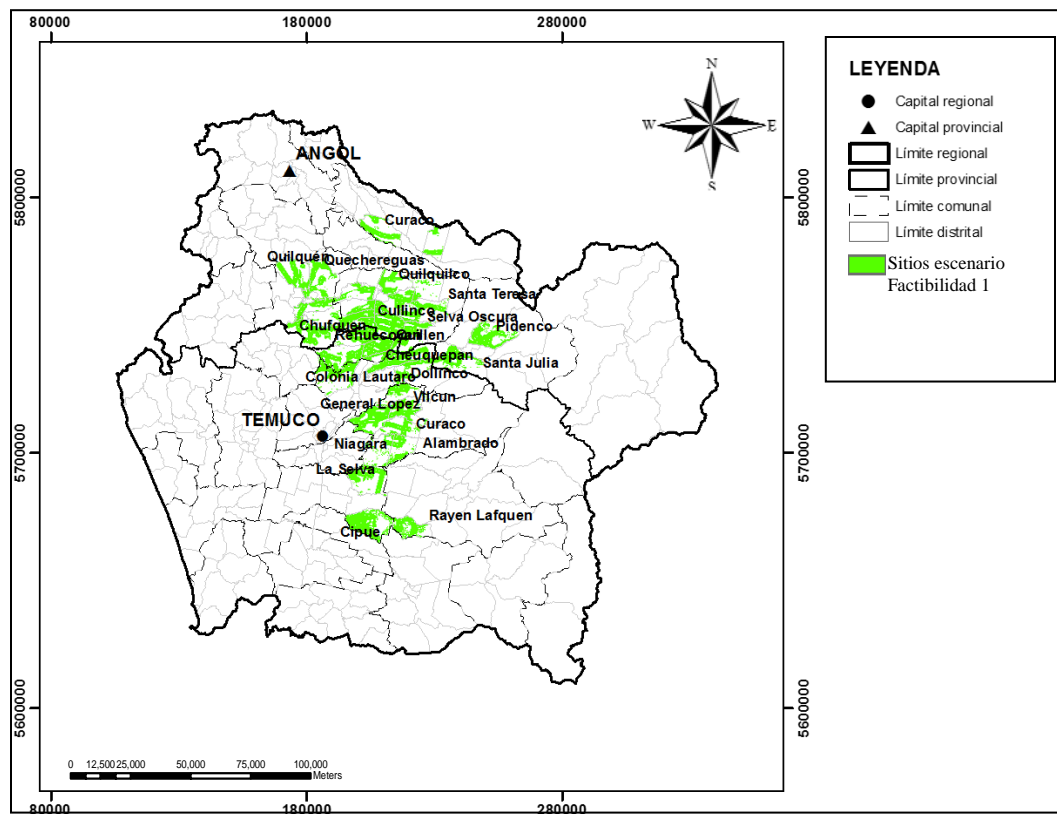


Figura 19 Localización de plantas bioenergéticas en Escenario de factibilidad 1 (Biomasa 5320 [t]).

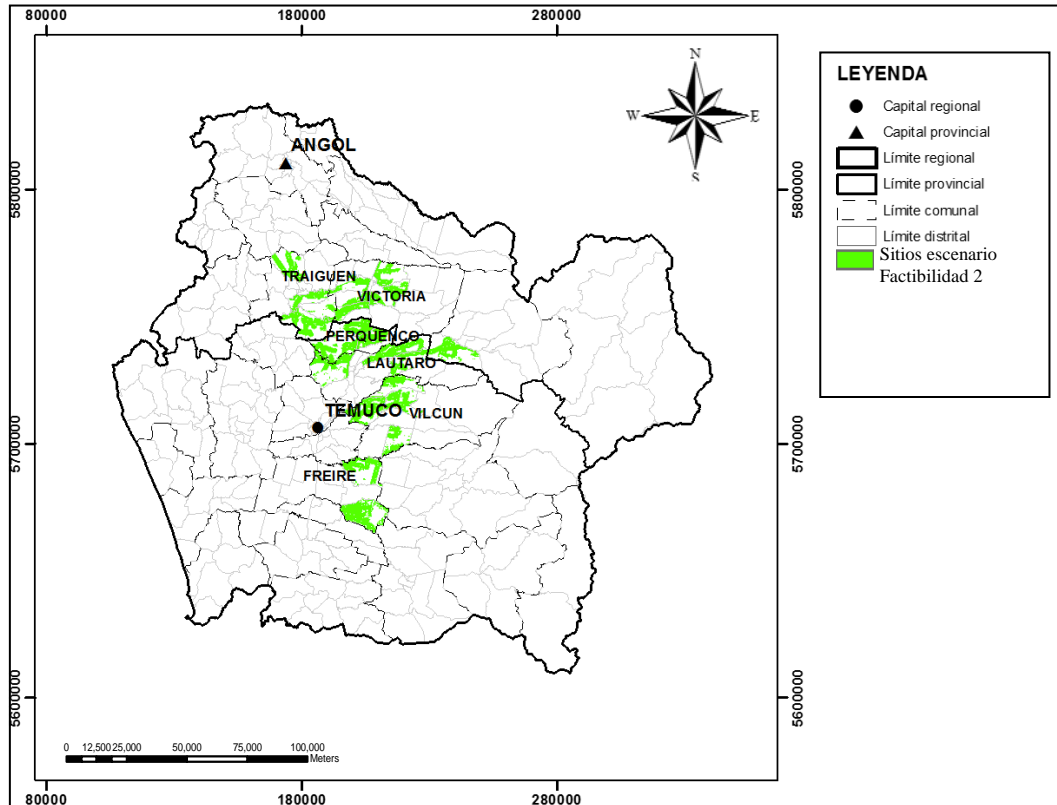


Figura 20 Localización de plantas bioenergéticas en Escenario de factibilidad 2. (Biomasa 8290 [t]).

6.4.4 Propuesta de sitios para emplazamiento de planta bioenergéticas según Escenario de Demanda.

Los sitios para emplazamiento de plantas bioenergéticas según el escenario de demanda, fueron definidos según la EMC, y se consideró como factores la biomasa residual, la alta demanda, uso de suelo, caminos y red eléctrica y se consideró como limitante las zonas de restricción. Los sitios óptimos para el escenario de demanda se obtienen del EMC (Figura 21) con una superficie de 183.235 [ha], correspondiente al 5,7% de la región de la Araucanía.

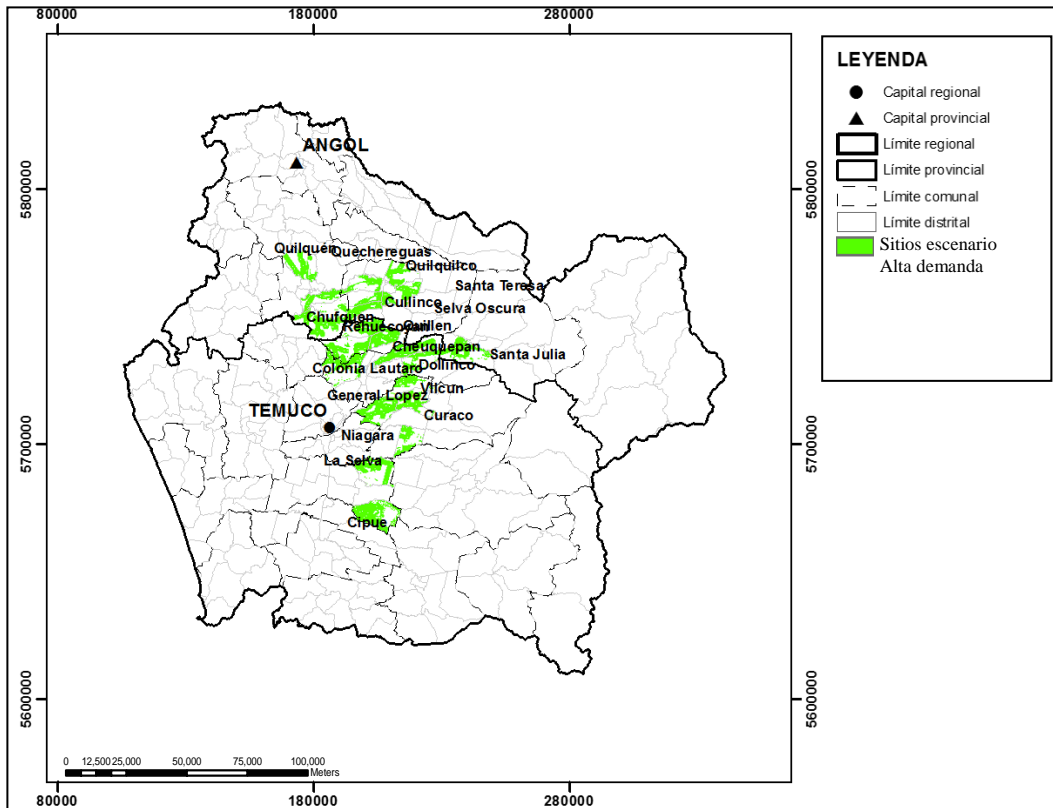


Figura 21 Localización de plantas bioenergéticas en Escenario de alta demanda.

Los sitios propuestos para localización de plantas bioenergéticas se localizan al centro de la región, en distritos como Quilquén, Cullinco, Selva Oscura y Niagara, entre otros.

En el Cuadro 28 se muestran los 43 los distritos donde es factible la instalación de plantas de generación de energía en base a biomasa residual, para al menos uno de los escenarios, ya sea social, de factibilidad o de alta demanda. Cinco distritos son alternativas viables en los tres escenarios (Figura 22) Los distritos de General López, La Selva, Rehuecoyan, Quilquén y Quilquico, tienen potencial biomásico, necesidades energéticas y factibilidad técnica para la construcción de plantas bioenergéticas, y constituyen el 1,7% de los distritos de la Región de la Araucanía.

Los distritos seleccionados, tienen las características propias de sitios donde se puede presentar una solución integrada a los objetivos sociales, de factibilidad y de alta demanda, y se perfilan como las mejores opciones para la instalación de plantas de energía.

Cuadro 28 Cumplimiento de los escenarios considerados para la instalación de plantas de bioenergía en los 44 distritos de la Región de la Araucanía.

Distrito	Escenario Social	(1) Escenario Factibilidad	(2) Escenario Factibilidad	Escenario Demanda
Alambrado		•	•	
Chamaco	•			
Cheuquepan		•	•	•
Chilvicoyan	•			
Chufquen	•	•	•	•
Cipue		•	•	
Colonia		•	•	•
Lautaro				
Contraco	•			
Copie	•			
Cullinco		•		•
Curaco		•		•
Dollinco		•	•	•
Entre Ríos	•			
General López	•	•	•	•
La Selva	•	•	•	•
Las Araucarias	•			
Los Alpes	•			
Madihue	•			
Manzanaco	•			
Niagara		•		•
Parlamento	•			
Pidenco		•		
Quechereguas		•		
Quillén				•
Quilquén	•	•	•	•
Quilquilco	•	•	•	•
Quiltrilpe	•			
Rahue	•			
Ranquil	•			
Rayen Lafquén		•		
Rehueco		•	•	•
Rehuecoyan	•	•	•	•
Relún	•			
San Andrés		•		
San Rafael	•			
Santa Ana	•			
Santa Julia		•	•	•
Santa Teresa		•	•	•
Selva Oscura		•		•
Tricauco	•	•		•

Distrito	Escenario Social	(1) Escenario Factibilidad	(2) Escenario Factibilidad	EscenarioDemanda
Vilcún		•	•	
Total	22	23	14	17

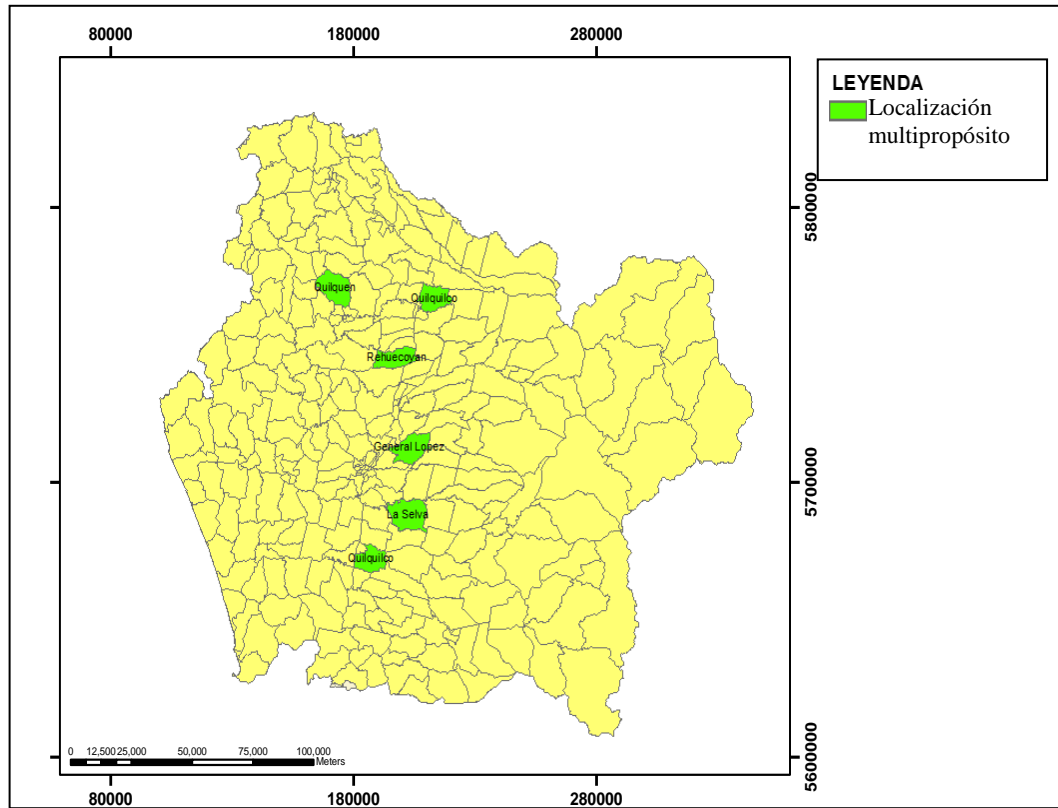


Figura 22 Localización de plantas bioenergéticas para los tres escenarios en conjunto.

7. CONCLUSIÓN

La metodología desarrollada para el aprovechamiento de biomasa residual de cultivos en la Región de la Araucanía, constituye una aproximación a la caracterización técnica de la producción de biomasa y a las alternativas de generación eléctrica, mediante gasificación y electrificación.

El método de la Relación Residuo-Producto RRP para determinar la biomasa residual de maíz y trigo, cuantificó que la biomasa residual de maíz generada por la región de la Araucanía, fue de 4,72 [Mt año⁻¹] y de trigo fue de 622 [Mt año⁻¹]. El 95% de la producción de biomasa residual de maíz de la Región de la Araucanía, se encuentran concentrada, en magnitud y en localización, en los distritos de Roblería, Huequén, Renaico, Mininco, ubicados al norte de la región próximos a la comuna de Angol (Capital provincial) y Catripulli, localizado al sur de la comuna de Temuco, capital regional. El 50% de la producción de biomasa residual de trigo de la Región de la Araucanía, es producida, en 23 distritos, los que pueden ser agrupados en los valles de la región, donde destacan los distritos de Quilquén, Rehucoyán Parlamento, La Selva, Quilquilco.

El método de coeficientes de residuos, determinó que la producción de residuos de maíz en la región de la Araucanía fue de 3,462 [Mt año⁻¹], y de trigo fue de 190,54 [Mt año⁻¹]. El 88% de la producción de maíz esta concentrado en los distritos de Roblería, Mininco Renaico, Huequén y Catripulli. El 50% del total de la producción de residuos de trigo, se distribuye en 31 distritos y destacan los distritos de Quilquén, Rehucoyán, Parlamento y La Selva.

El método de RRP y el de coeficientes de residuos, constituyen aproximaciones para cuantificar la generación de residuos, mediante cálculos sencillos y que requieren datos genéricos. Estas cuantificaciones pueden mejorar su exactitud con ajustes mediante datos locales. La generación de datos a escala distrital permite identificar el potencial de biomasa residual, y facilita la planificación de su aprovechamiento a través de proyectos energéticos.

La disponibilidad temporal de los residuos de biomasa, es entre enero y marzo, por lo que es necesario planificar el aprovechamiento de la biomasa residual para contar con un suministro continuo o incluir otros cultivos con desfase de cosecha, para asegurar la disponibilidad de materia prima para la generación energética. Se puede establecer que existe actualmente un residuo de biomasa que es posible de aprovechar en la generación eléctrica. La biomasa actualmente es quemada en los campos y no tiene valor comercial, sin embargo las técnicas de cultivos varían de un lugar a otro y es necesario investigar en escala local, el uso de los residuos antes de disponer de ellos.

La determinación de la disponibilidad de biomasa residual tiene como limitante, la temporalidad y escala de la información. Los datos de referencia pertenecen al Censo Silvoagropecuario 2007 y los que lo anteceden son cada diez años y a escala regional, que no presentan utilidad para los propósitos del desarrollo metodológico. Información espacio-

temporal adecuada, permitiría realizar proyecciones de la producción de la biomasa residual, y oferta energética, de un área determinada, lo que facilitaría la estimación exacta de una propuesta de emplazamiento de plantas bioenergéticas.

Los sitios prioritarios para el abastecimiento energético y que tienen alta demanda, en la Región de la Araucanía, corresponden a los distritos de las comunas de Carehue, Entre ríos, Contraco, Rahue. Por su parte, los sitios identificados como de alta demanda social conforman un “cluster” alrededor de las comunas de Temuco y Angol. Los sitios identificados por prioritarios en alta demanda, demanda potencial y demanda social son los distritos de Los Alpes, San Rafael, Entre Ríos, Contraco, Ranquil, los que constituyen una superficie de 458,8 [Mha].

Las opciones tecnológicas para el aprovechamiento energético de la biomasa residual, son la tecnologías de la combustión y de la gasificación. Estas opciones tecnológicas se proyectan como las más interesantes, por su grado de madurez y versatilidad, además de que pueden emplearse a distintas escalas. Los sitios propuestos para el establecimiento de plantas bioenergéticas, fueron seleccionados, principalmente, por la distribución de la biomasa, y coincidieron con los distritos de mayor disponibilidad de biomasa residual. Los áreas que representan una alternativa de ubicación según los escenarios social, de factibilidad y de alta demanda, fueron los distritos de General López, La Selva, Rehuecoyán, Quilquén y Quilquilco.

El aprovechamiento energético de la biomasa residual, es un acercamiento al potencial de Chile para utilizar, con fines energéticos, los residuos de cultivos agrícolas. Las propuestas de áreas prioritarias de abastecimiento energético de biomasa y de instalación de plantas bioenergéticas, constituyen un aporte en la toma de decisiones en temas de carácter energético, social y ambiental.

8. BIBLIOGRAFÍA

AMIS (Agricultural Market Information System). 2011. AMIS Statics. [En línea]. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Italia, Roma. Recuperado en <<http://statistics.amis-outlook.org/data/index.html>>. Consultado el: 19 de Enero de 2014.

Álvarez, C. 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 359: 63-89.

Andrade, M.; A. Perez-Navarro; A. Solar; P. Catillo; Y. Tamayo; L. Rojas. et al. 2009. Metodología para el aprovechamiento energético de biomasa en Cuba. [En línea]. Habana, Cuba. Recuperado en <<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9382/2/P40.pdf>>. Consultado el: 9 de Octubre de 2013.

Angelidaki, I. and L. Ellegaard. 2003. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plant. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109(1-3): 2147-2160.

Bauen, A.; J. Woods and R. Hailes. 2004. A Biomass Blueprint to Meet 15 % of OECD Electricity Demand by 2020. Centre for Energy Policy and Technology. Londres, Inglaterra. 74 p.

BCN (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile). 2011. Comparación de Precios de Electricidad en Chile y países de la OCDE y América Latina. [En Línea]. Santiago, Chile. Recuperado en <http://transparencia.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/16020/1/Informe_Comision%20Final_v4.doc>. Consultado el: 5 de Noviembre de 2013.

Brown, G.; A. Hawkes; A. Bauen and M. Leach. Biomass Applications. 2007 Centre for Energy Policy and Technology. Londres, Inglaterra. 18 p.

California Energy Comision. 2008. An Assessment of Biomass Resources in California, 2007. Department of Biological and Agricultural Engineering. California, Estados Unidos. 155 p.

Caputo, A.; M. Palumbo; P. Pelagagge and F. Scacchia. 2005. Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. *Biomass and Bioenergy*, 28 (1): 35-51.

CCTP (Comisión Ciudadana-Técnico-Parlamentaria para la Política y la Matriz Eléctrica). 2011. Chile necesita una gran reforma energética. Santiago, Chile. 138 p.

CDEC-SIC (Centro de Despacho Económico de Carga-Sistema Interconectado Central). 2013 Estadísticas de operación 2003-2012. [En línea]. Recuperado en: <<https://www.cdec-sic.cl/datos/anuario2013.pdf>>. Consultado el: 15 de Enero de 2014.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2004. Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe: situación y propuestas de políticas. [En línea]. Recuperado en <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/2/14982/Lcl2132e_s.pdf>. Consultado el: 10 de Julio de 2013.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2009. Contribución de los servicios energéticos a los objetivos de Desarrollo del Milenio y la mitigación de la pobreza en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 89 p.

Chamy, V. y E.Vivanco. 2007. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponible en Chile para la generación de biogás. Comisión Nacional de Energía, Proyecto de energías no renovables. Santiago, Chile. 134 p.

CIE (Centro de Innovación en Energía); NEIM (Núcleo Milenio de Electrónica Industrial y Mecatrónica de la Universidad Técnica Federico Santa María) y PRIEN (Programa de Estudios e Investigaciones en Energía del Instituto de Asuntos Públicos de la Universidad de Chile). 2008. Aporte potencial de Energías Renovables No Convencionales y Eficiencia Energética a la Matriz Eléctrica, 2008-2025. [En línea]. Recuperado en <http://www.neim.utfsm.cl/arch/20080808-09-Chile_New%20Renewables_spanish.pdf>. Consultado el: 18 julio de 2013.

CIREN (Centro de Información de recursos naturales). 1989a. Requerimientos de clima y suelo, cereales, cultivos industriales y flores. Santiago, Chile. 53 p.

CIREN (Centro de Información de recursos naturales). 1989b. Requerimientos de clima y suelo, chacras y hortalizas. Santiago, Chile. 58 p.

CNE (Comisión Nacional de Energía). 2008. Política Energética: Nuevos Lineamientos. Santiago, Chile. 113 p.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2008. Caracterización de los cultivos y residuos de vegetales derivados de la cosecha de productos forestales y agrícolas en Chile. Santiago, Chile. 92 p.

CONICYT (Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica). 2013. Región de la Araucanía, Diagnóstico de las capacidades y oportunidades de desarrollo de la ciencia, la tecnología y la innovación. Santiago, Chile.

De la Paz, C. 2013. Metodología SIG para la Localización de Centrales de Biomasa mediante Evaluación Multicriterio y Análisis de Redes. CIEMAT. Madrid, España. 58p.

Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. 2009. Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (CIIU). Nueva York, Estados Unidos. 346 p.

DGRAG (Dirección General de Recursos Agrícolas). 2010. El sector del biogás agroindustrial en España. 89 p.

EIA (Energy Information Administration). World total primary energy consumption by region, Reference case, 2009-2040. [En línea] Recuperado en: <<http://www.eia.gov/forecasts/ieo/world.cfm>>. Consultado el: 7 de Julio de 2013.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2008. Forests and energy, key issues. Italia, Roma. 57 p.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2009. Evaluación de recursos leñosos para fines energéticos. [En línea]. FAO Departamento Forestal Dendroenergía. Recuperado en: <<http://www.fao.org/docrep/012/i1320s/i1320s00.pdf>>. Consultado el: 8 de Julio de 2013.

Fundación Chile. 2008. Potencial de Biomasa para Combustibles Alternativos. Santiago, Chile. 107 p.

Gatica, L y M. Alonso. 2013. Disponibilidad y potencial energético de los principales residuos agrícolas de las zonas Centro y Centro Sur de Chile. Consorcio Tecnológico de Biocombustibles (BIOCOMSA) y Facultad de Agronomía, Universidad de Chile Santiago, Chile. 76 p.

Herrera-Seara, M.; F. Aznar, M. Zamorano and E. Alameda-Hernandez. 2010. Optimal location of a biomass power plant in the province of Granada analyzed by multi-criteria evaluation using appropriate Geographic Information System according to the Analytic Hierarchy Process. *In*: International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Granada, España. Marzo 23-25, 2010. Granada, España.

INE (Instituto Nacional de Estadística). 2002. Catastro de viviendas electrificadas a escala distrital.xls.

INE (Instituto Nacional de Estadística). 2005. Chile: Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos. Santiago, Chile. 300 p.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2007. Cuadro 1: número y superficie de las explotaciones censadas por tipo, según región, provincia y comuna.xls. Recuperado en <<http://www.censoagropecuario.cl/index2.html>>. Consultado el: 8 de Marzo.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas) Los Lagos. 2012. Producto interno bruto por regiones anual. Recuperado en <

www.ineloslagos.cl/app/bancodatos/BANCO_DATOS.../1021101.xls >. Consultado el: 10 de Marzo de 2014.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Agriculture. (cap. 8, pp. 499) 540). Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Crambridge, Estados Unidos. 851p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2012. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. New York, Estados Unidos. 1076p.

IEA (International Energy Agency). 2012a. Key world energy statistics. Soregraph. Paris, Francia. 80p.

IEA (International Energy Agency). 2012b. Renewables Information, IEA statics. Francia, Paris. 497p.

IEA (International Energy Agency). 2013. Key world energy statics 2013. Francia, Paris. 82p.

Iriarte, A.; J. Rieradevall and X. Gabarrell. 2010. Life cycle assessment of sunflower and rapeseed as energy crops under Chilean conditions. *Journal of Cleaner Production*, 18 (4) 336-345.

Jolli, D y S. Giljum. 2005. Unused biomass extraction in agriculture, forestry and fishery. Sustainable Europe Research Institute (SERI). Viena, Austria. 40p.

Lal, R. 2005, Mayo. World crop residues production and implicaciones of its use as a biofuel. *Environment International*, 31(4) 575-84.

Machado, C. 2010. Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. Embrapa, Brasil. 99p.

Ministerio de Desarrollo Social. 2012. Base de datos de Encuesta Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN). Recuperado en <<http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/basededatos.php>>. Consultado el: 24 de Noviembre de 2013.

Ministerio de Energía. 2011a. Modelos de negocio que rentabilicen aplicaciones de biogás en Chile y su fomento. Santiago, Chile. 205p.

Ministerio de Energía. 2011b. Plan de acción de eficiencia energética. Recuperado en: <http://www.minenergia.cl/documentos/otros-documentos/plan-de-accion-de-eficiencia.html>. Consultado el: 30 de Octubre de 2013.

Ministerio de Energía. 2012a. Balance Nacional de Energía 2011. [En línea]. Recuperado en:

<http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14_portal_informacion/06_Estadisticas/Balances_Energ.html>. Consultado el: 16 de Julio de 2013.

Ministerio de Energía. 2012b. Estrategia Nacional de energía 2012-2030. Recuperado en:

<<http://www.minenergia.cl/documentos/estudios/estrategia-nacional-de-energia-2012.html>>. Consultado el: 10 de Julio de 2013.

Ministerio de Energía. 2013. Balance nacional de energía año 2012. Santiago, Chile. [En línea].

Recuperado en <http://antiguo.minenergia.cl/minwww/export/sites/default/14_portal_informacion/06_Estadisticas/Documentos/BNE2012.xls

>. Consultado el: 25 de Octubre de 2013

MMA (Ministerio de Medio Ambiente). 2012a. Informe del estado del medio ambiente. 2011. 2^{ed}, Santiago, Chile. 511p.

MMA (Ministerio de Medio Ambiente). 2012b. Registro de emisiones y transferencia de contaminantes (RETC).kml. [En línea]. Recuperado en <<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-42161.html#>>. Consultado el 27 de diciembre.

MMA (Ministerio de Medio Ambiente). 2013. Infraestructura de datos espaciales. [En línea]. Recuperado en <<http://ide.mma.gob.cl/>>. Consultado el: 10 de noviembre de 2013.

Moragues, J. y A. Rapallini. 2003. Energía de la biomasa. [En línea] Recuperado en <http://www.iae.org.ar/renovables/ren_biomasa.pdf>. Consultado el: 20 de marzo, 2014.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) y FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2005. Perspectivas agrícolas OCDE-FAO 2005-2014. Roma, Italia. 192p.

ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). 2008. [on-line]. Biomasa, agroenergía, bioenergía, eficiencia energética, ahorro energético: ¿tienen sentido?. [En línea] Recuperado en el <<http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/2106.pdf>>. Consultado el: 9 de julio de 2013.

ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). 2012a. Mercado agropecuarios Septiembre 2012. Santiago, Chile. 19p.

ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). 2012b. Panorama de la agricultura chilena. Santiago, Chile. 127p.

O`Ryan, R.; M. Díaz y J. Clerc. 2010. Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero en Chile 2007-2030 y opciones de mitigación. Programa de gestión y economía ambiental (PROGEA). Santiago, Chile. 97p.

Palma, R.; G. Jiménez e I. Alarcón. 2009. Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno. Fundación para la Transferencia Tecnológica (UNTEC). Santiago, Chile. 122 p.

Paneque, M.; C. Román-Figueroa; R. Vasquez-Panizza; J. Arriaza; D. Morales y M. Zulantay. 2011. Bioenergía en Chile. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 126p.

Pelkonen, P.; H. Hakkila; T. Karjalainen and B. Schlamadinger. 2001. Woody biomass as an Energy source- Challenges in Europe. Joensuu, Finland. 176p.

Petrov, O. 2012. Forest Residues to Energy: Is this a pathway towards healthier communities?. [En línea] National Collaborating Centre for Environmental Health (NCCEH). Recuperado en : <http://www.nccch.ca/sites/default/files/Forest_%20Residues_to_Energy_Mar_2012.pdf>. Consultado el: 10 de Enero de 2014.

Rajvanshi, A. 1986. Biomass gasification (cap. 4, pp. 83-102). Alternative Energy in Agriculture. Maharashtra, India. 102p.

SIIT (Sistema Integrado de Información Territorial). 2013. Mapas vectoriales. [En línea]. Recuperado en: < http://siit2.bcn.cl/mapas_vectoriales/index_html/>. Consultado el 5 de septiembre de 2013.

Silva, P., M. Garrido y E. Acevedo. 2011. Criterios técnicos para el manejo del trigo candeal. Santiago, Chile. 56p.

Sims, R.; A. Hasting; B. Schalamadinger; G. Taylors y P. Smith. 2006. Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biology*. 12 (11):2054–2076.

UNEP (United Nations Environmental Programme). 2009 Converting Waste Agricultural Biomass into a resource. Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre. Shigan, Japan. 441p.

UTFSM (Universidad Técnica Federico Santa María). 2007. Potencial Productivo de Biocombustibles en Chile con Cultivos Agrícolas Tradicionales. Santiago, Chile.155p.

UTFSM (Universidad Técnica Federico Santa María). 2008. Potencial de Biomasa en Chile.

[En línea]. Recuperado en:
<http://www.archivochile.com/Chile_actual/patag_sin_repre/03/chact_hidroy-3%2000019.pdf>. Consultado el: 10 de diciembre de 2013.

Yakima County Public Works. 2003. Review of Biomass Fuels and Technologies. Washington, Estados Unidos. 49p.

9. APÉNDICE

Apéndice I. Capas temáticas que se utilizaron para la obtención de las zonas prioritarias de alta demanda.

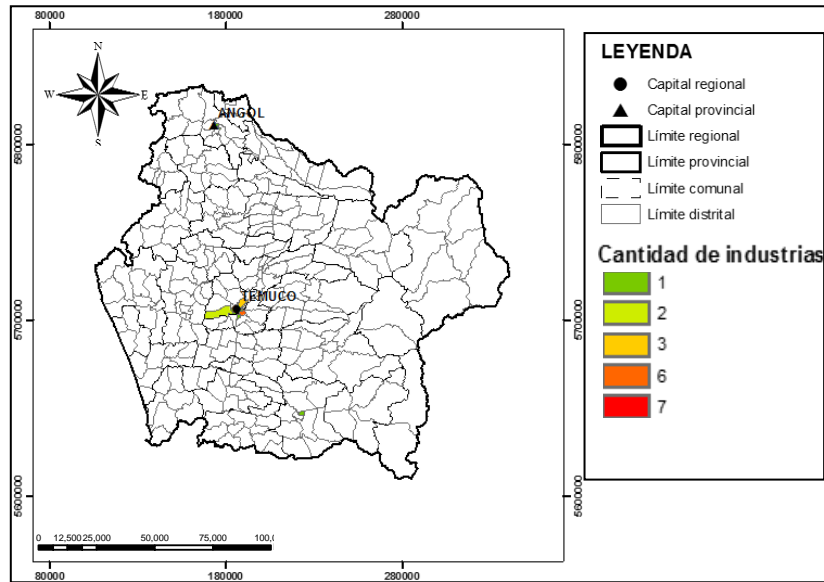


Figura 23 Cantidad de industrias por distrito.

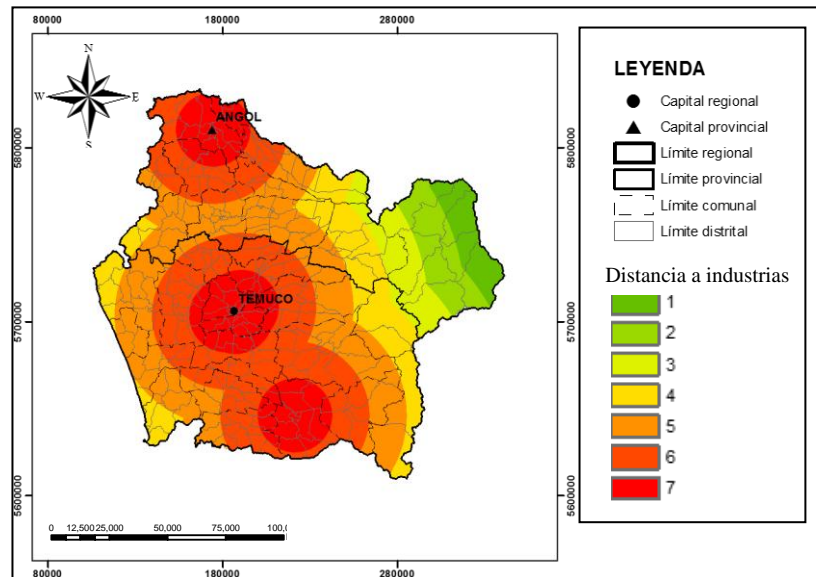


Figura 24 Distancia a industrias.

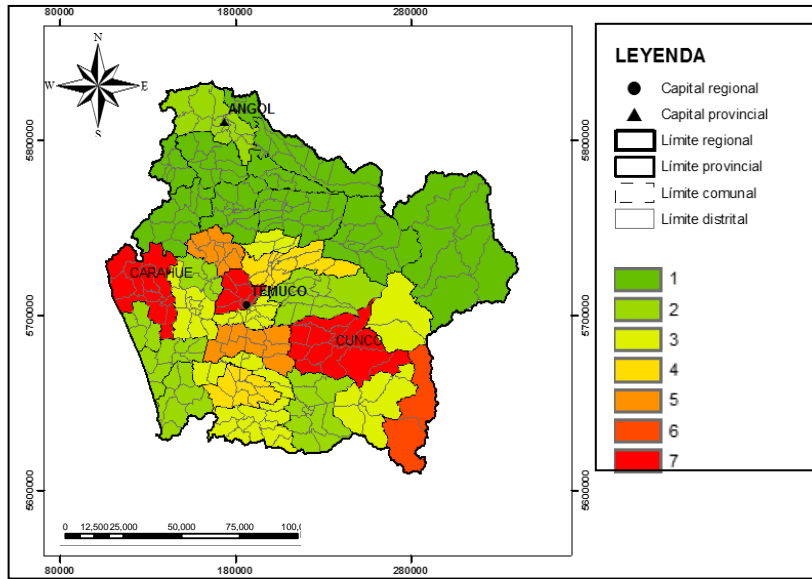


Figura 25 Consumo eléctrico por comuna.

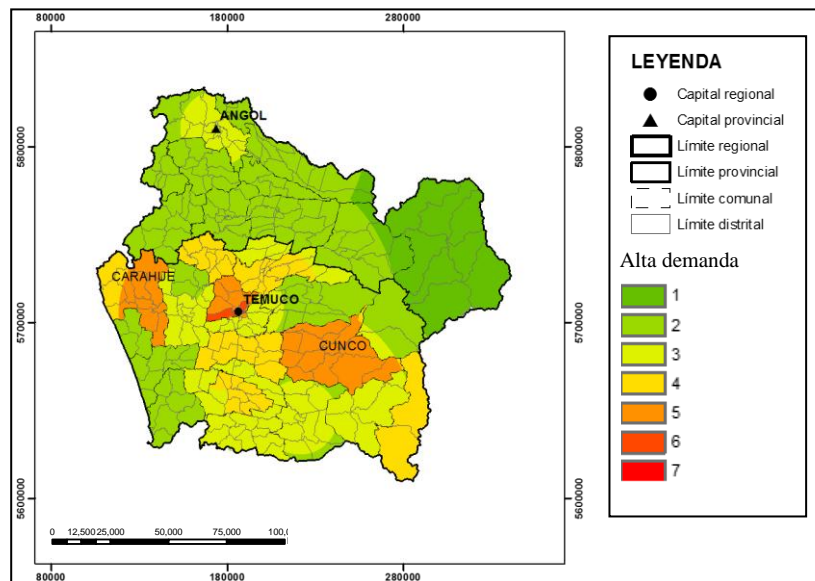


Figura 26 Alta demanda

Apéndice II. Capa temática que se utilizó para la obtención de las zonas prioritarias de demanda potencial.

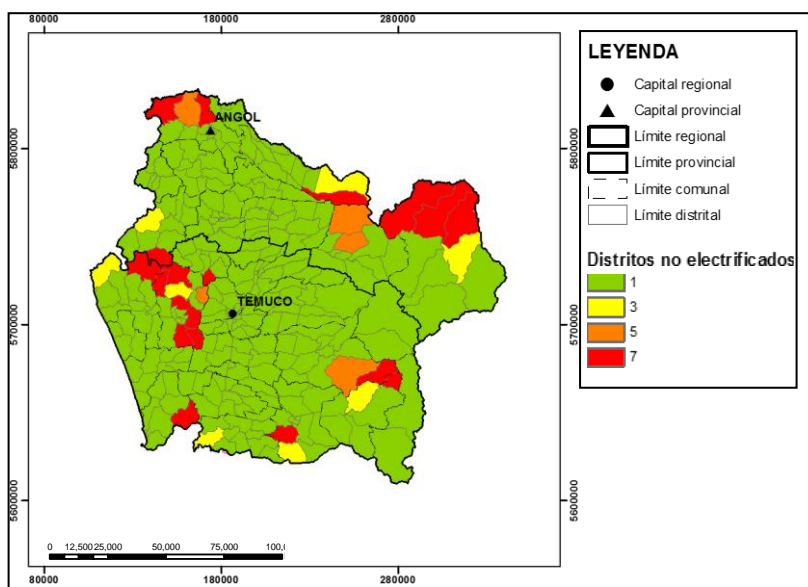


Figura 27 Demanda potencial, distritos no electrificados.

Apéndice III. Capas temáticas que se utilizaron para la obtención de las zonas prioritarias de demanda social.

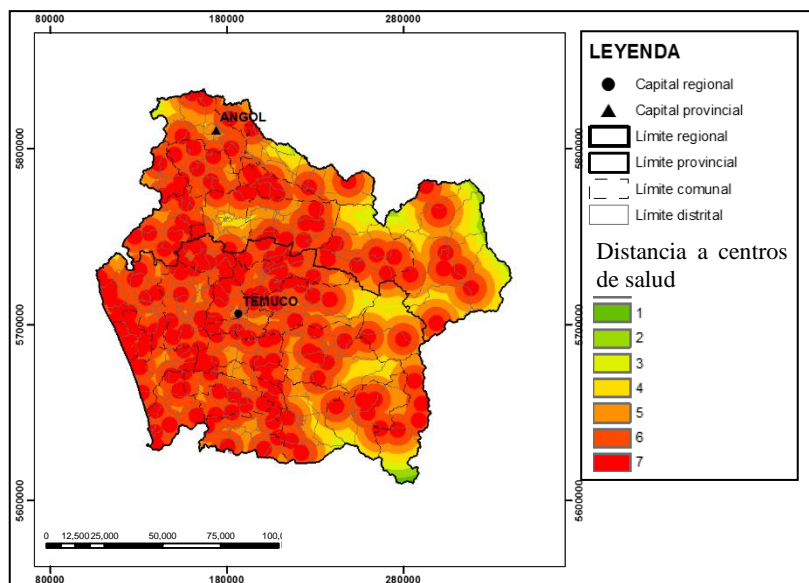


Figura 28 Distancia a centros de salud.

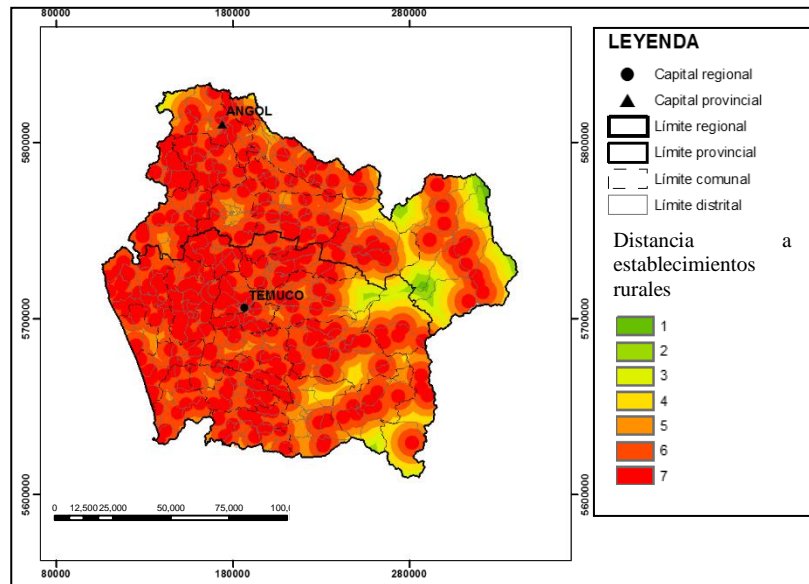


Figura 29 Distancia a establecimientos rurales.

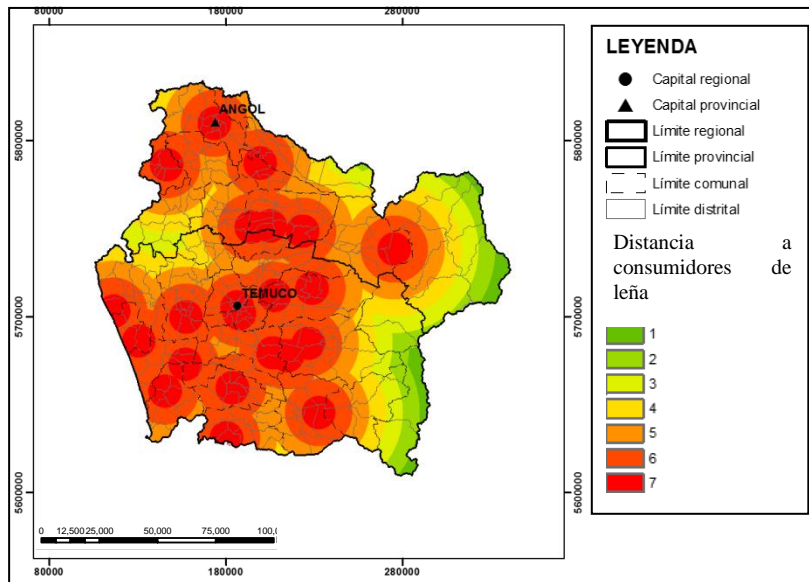


Figura 30 Distancia a asentamientos consumidores de leña.

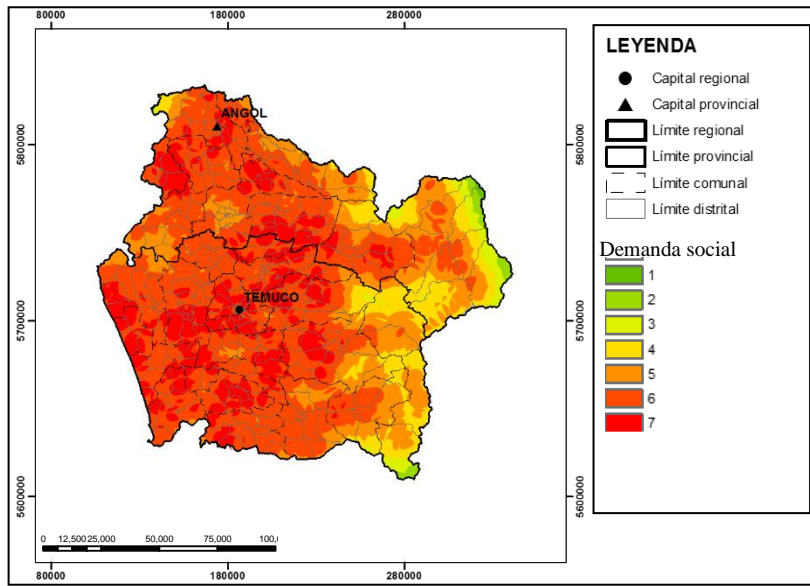


Figura 31 Demanda social.

Apéndice IV. Capas temáticas de factores que se utilizaron para la determinación de la localización óptima de una planta de biomasa.

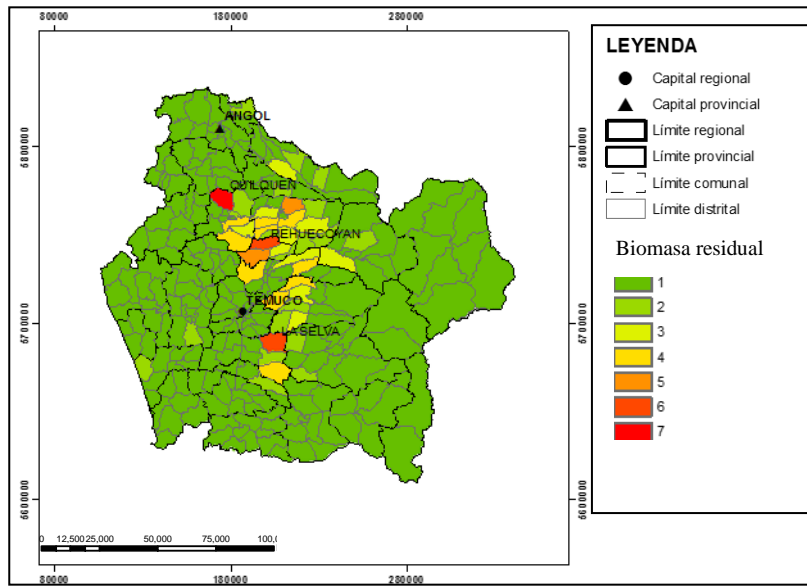


Figura 32 Biomasa residual de maíz y trigo método RRP.

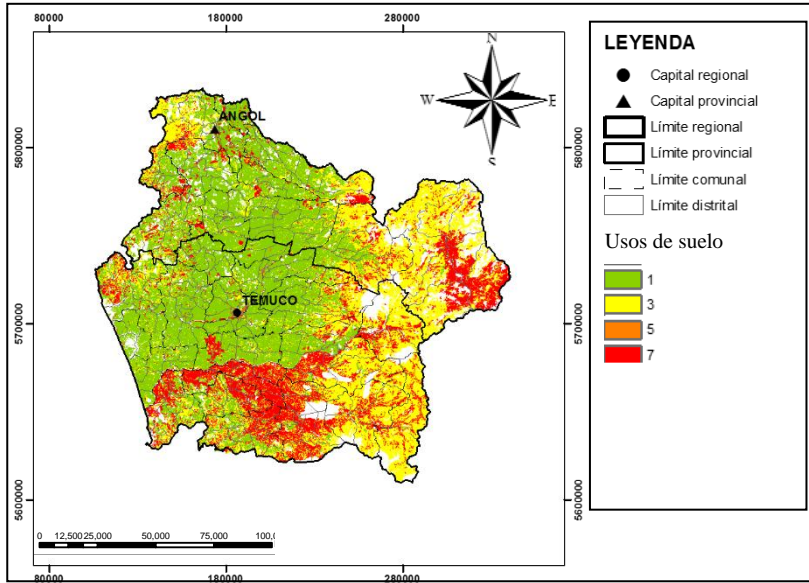


Figura 33 Usos de suelo

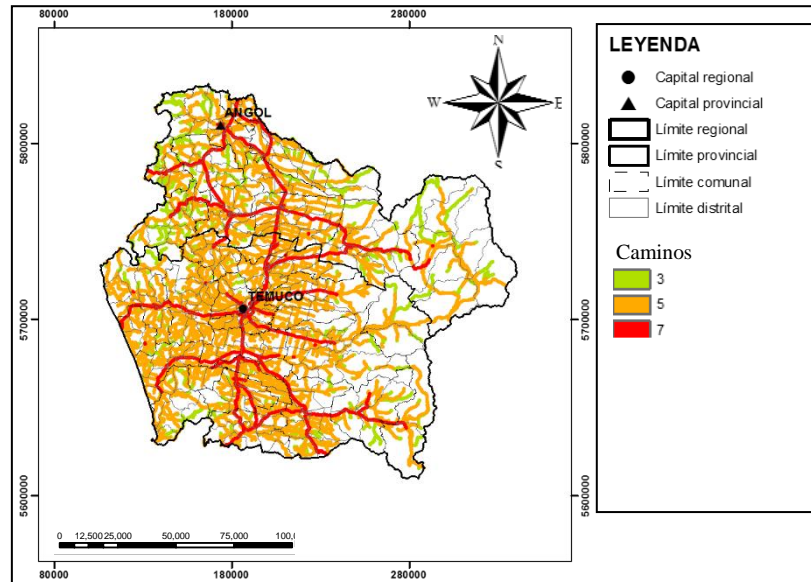


Figura 34 Buffer de caminos, diferenciado por tipos.

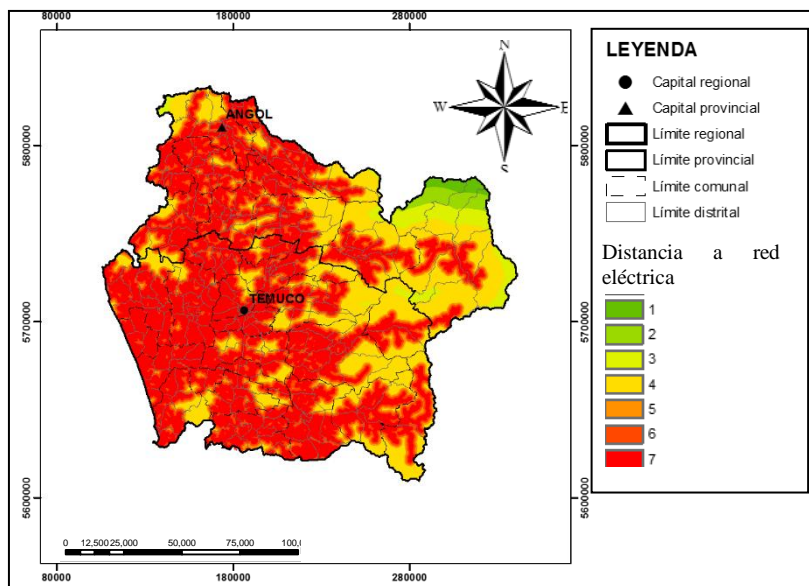


Figura 35 Distancia a red eléctrica de distribución.

Apéndice V. Capas temáticas de limitantes que se utilizaron para la determinación de la localización óptima de una planta de biomasa.

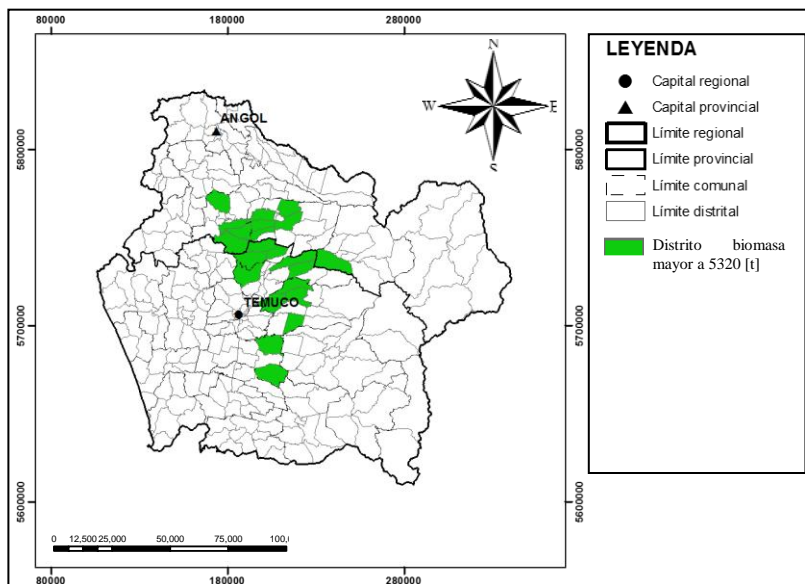


Figura 36 Distritos con biomasa superior a 5320 [t]

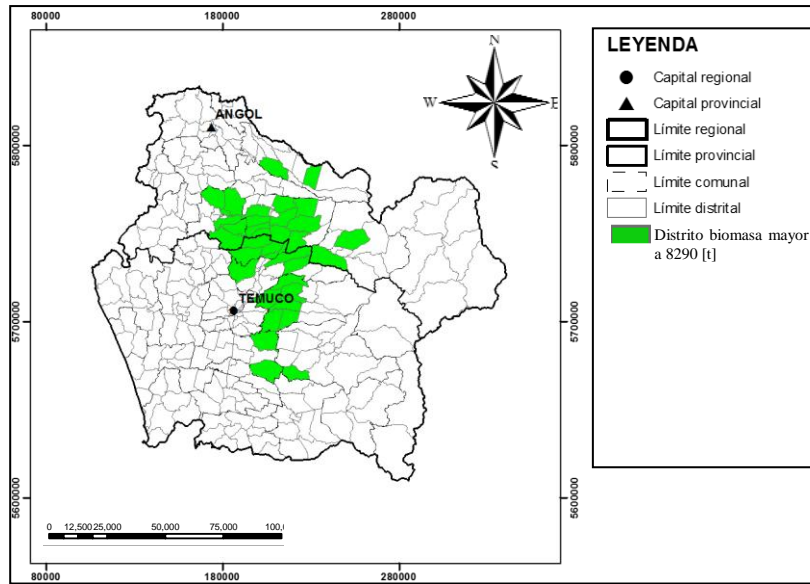


Figura 37 Distritos con biomasa superior a 8290 [t]

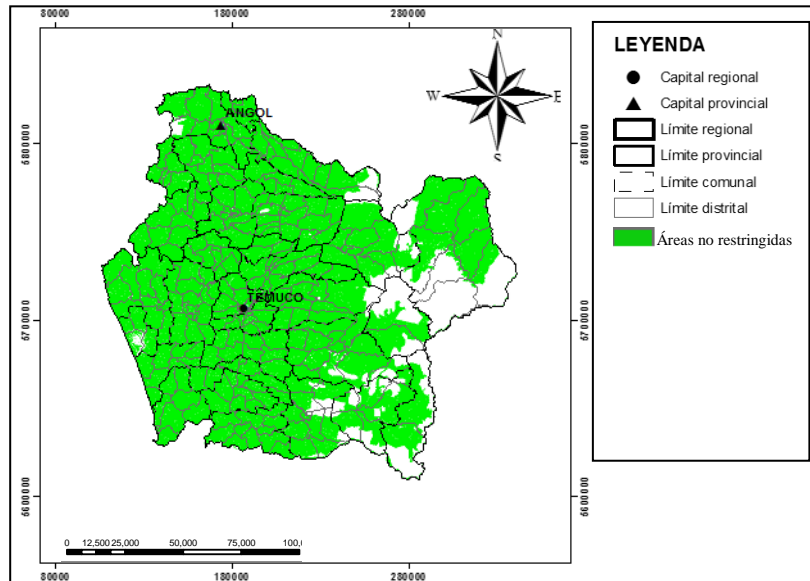


Figura 38 Áreas no restringidas.