

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

ESCUELA DE PREGRADO

**ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA Y PRODUCTIVA PARA EL
ESTABLECIMIENTO DE ÁREAS POTENCIALES DE CULTIVOS
BIOENERGÉTICOS DE CHAÑAR (*Geoffroea decorticans* [Gill. ex Hook. et Arn.]
Burk.) Y MADI (*Madia sativa* Mol.) EN CHILE.**

IGNACIO JAVIER YAÑEZ PINNA

**Santiago, Chile.
2014**

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

ESCUELA DE PREGRADO

**ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA Y PRODUCTIVA PARA EL
ESTABLECIMIENTO DE ÁREAS POTENCIALES DE CULTIVOS
BIOENERGÉTICOS DE CHAÑAR (*Geoffroea decorticans* [Gill. ex Hook. et Arn.]
Burk.) Y MADI (*Madia sativa* Mol.) EN CHILE.**

**PRODUCTIVE AND AGROECOLOGICAL ZONING FOR POTENTIALLY
SUITABLE AREAS OF CHAÑAR (*Geoffroea decorticans* [Gill. ex Hook. et Arn.]
Burk.) AND MADI (*Madia sativa* Mol.) CROPS FOR BIOENERGETIC MEANS IN
CHILE.**

IGNACIO JAVIER YAÑEZ PINNA

**Santiago, Chile.
2014**

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA Y PRODUCTIVA PARA EL
ESTABLECIMIENTO DE ÁREAS POTENCIALES DE CULTIVOS
BIOENERGÉTICOS DE CHAÑAR (*Geoffroea decorticans* [Gill. ex Hook. et Arn.]
Burk.) Y MADI (*Madia sativa* Mol.) EN CHILE.

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

IGNACIO JAVIER YAÑEZ PINNA

	Calificaciones
Profesor Guía Manual Paneque C. Bioquímico, Dr.	6,8
Profesores Evaluadores Juan Manuel Uribe Ingeniero Agrónomo.	6,5
Alejandro León S. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,2
Colaborador Celián Román Ingeniero en Recursos Naturales Renovables.	

Santiago, Chile.
2014

INDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
ABREVIATURAS	5
INTRODUCCIÓN	8
ESTADO DEL ARTE	11
BIOCOMBUSTIBLES	11
<i>i. Biodiesel</i>	12
<i>ii. Bioetanol</i>	12
<i>iii. Biogás</i>	12
LOS BIOCOMBUSTIBLES EN EL MUNDO	12
BIOCOMBUSTIBLES EN CHILE	16
ESPECIES ENERGÉTICAS PARA LA PRODUCCIÓN EN CHILE.....	18
<i>i. Chañar</i>	19
<i>ii. Madi</i>	22
ZONIFICACIÓN DE CULTIVOS.....	23
MATERIALES Y METODOS	25
ÁREA DE ESTUDIO	25
MATERIALES	27
ESPECIES EN ESTUDIO	28
<i>i. Chañar</i>	28
<i>ii. Madi</i>	29
MÉTODO	30
INVENTARIO DE PARÁMETROS AGROECOLÓGICOS Y PRODUCTIVOS.	31
INVENTARIO DE LOS RECURSOS DE TIERRA	32
MODELO DE EVALUACIÓN DE LA APTITUD DE TIERRA	33
<i>i. Reglas de decisión</i>	34
<i>ii. Escala de clasificación</i>	35
MODELO DE PRODUCCIÓN	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
ZONIFICACIÓN MEDIANTE VARIABLES AGROECOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA DETERMINAR LA SUPERFICIE POTENCIAL DE ESTABLECIMIENTO DE LAS ESPECIES CHAÑAR Y MADI.....	39
<i>i. Chañar</i>	39
<i>ii. Madi</i>	40
REGLAS DE DECISIÓN.....	41
<i>i. Chañar</i>	41
<i>ii. Madi</i>	42
ZONIFICACIÓN DE APTITUD	43

<i>i. Chañar</i>	44
<i>ii. Madi</i>	48
ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA	53
<i>i. Zonificación agroecológica chañar</i>	54
<i>ii. Zonificación agroecológica madi</i>	59
ZONIFICACIÓN PRODUCTIVA.....	67
<i>i. Zonificación productiva chañar.</i>	67
<i>ii. Zonificación productiva madi</i>	69
CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	73
APÉNDICES	82
ANEXOS	100

RESUMEN

Chile necesita diversificar su matriz energética por razones geopolíticas y ambientales. Los cultivos energéticos constituyen una opción para revalorizar suelos fiscales y marginales, e impulsar una industria energética, económica y ambientalmente sostenible. Las especies nativas chañar (*Geoffroea decorticans* [Gill. ex Hook. et Arn.] Burk.) y madi (*Madia sativa* Mol.) pueden ser utilizadas como cultivos energéticos para la generación de biocombustibles de segunda generación.

La presente investigación tiene como propósito principal identificar las áreas con potencial para el establecimiento de las especies chañar y madi, con fines bioenergéticos en Chile. La identificación se realizó según el concepto de zonificación agroecológica, que de acuerdo con los criterios FAO, define zonas en base a combinaciones de variables climáticas, y edáficas que caracterizan a cada especie, utilizando sistemas de información geográfica (SIG). Los rangos y criterios de adaptabilidad identificados se evaluaron en base a una escala de clasificación que da cuenta de zonas con diferentes grados de adaptabilidad y zonas con distintos niveles de restricción climática, que consideró una regla de decisión integrada al modelo de evaluación de tierras, identificando áreas potenciales de establecimiento clasificada en aptitudes óptimas, aptas y marginales de adaptación.

Los terrenos identificados con potencial aptitud agroecológica para el establecimiento de la especie chañar se cuantificaron en 7.900.728ha, terrenos dispuestos desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Valparaíso, de estos 1.236.641ha se clasificaron con aptitud óptima, 6.438.778ha con aptitud apta y 225.309ha con aptitud marginal. La III Región de Atacama presentó la mayor superficie con potencial para el establecimiento de chañar con 1.564.555ha equivalentes al 20,7% de la superficie regional. La aptitud productiva para la especie chañar se estimó en 87.033kg ms ha⁻¹ para todo el área con aptitud agroecológica, donde la Región de Tarapacá presentó la mayor producción media estimada en 15.736kg ms ha⁻¹. Los terrenos identificados con potencial para el establecimiento de la especie madi se cuantificaron en 7.240.451ha dispuestas desde la Región de Atacama hasta la Región de Los Lagos, de estos 4.815.900ha se clasificaron con aptitud óptima, 1.852.062ha con aptitud apta y 572.489ha con aptitud marginal. La IV Región de Coquimbo presentó la mayor superficie con potencial para el establecimiento de madi con 1.268.048ha equivalentes al 31,3% de la superficie regional. La aptitud productiva para la especie madi se estimó en 12.758kg ms ha⁻¹ para todo el área con aptitud agroecológica, donde la Región del Maule presentó la mayor producción media estimada en 1.612kg ms ha⁻¹.

La investigación concluyó que la zonificación agroecológica para las especies chañar y madi representan una aproximación confiable para el desarrollo, principalmente, de estas especies con fines bioenergéticos, en las regiones de Coquimbo y El Maule.

Zonificación agroecológica, SIG, biocombustibles, cultivos energéticos.

ABSTRACT

Chile needs to diversify its energy matrix for geopolitical and environmental reasons. Energy crops are an option to revalue tax marginal land, and promote an energy, economic and environmentally sustainable industry. Native species chañar (*Geoffroea decorticans* [Gill. Ex Hook. Et Arn.] Burk.) and madi (*Madia sativa* Mol.) can be used as energy crops for the generation of second generation biofuels.

This research has as main purpose to identify areas with potential for establishment of species and madi chañar, bioenergy purposes in Chile. Identification was performed according to the concept of agro-ecological zoning, which according to FAO criteria define zones based on combinations of climatic and soil variables, that characterize each species, using geographic information systems (GIS). Ranges and adaptability criteria identified were evaluated based on a rating scale that accounts for areas with different degrees adaptability and areas with different levels climate restriction, which considered a decision rule to integrated land evaluation model, identifying potential areas of property classified under optimal, fit and marginal adaptation.

The sites identified with potential agroecological potential for the establishment of the chañar were quantified in 7.900.728ha, disposed from the Arica and Parinacota region to Valparaíso region, 1.236.641ha of these were classified with optimal land, 6.438.778ha Fit land and 225.309ha marginal land. The Atacama region had the highest surface potential for establishing chañar with 1.564.555ha equivalent to 20,7% of the regional area. The productive capacity of the chañar species was estimated at 87.033kg ms ha⁻¹) for all agroecological potential area where the Tarapacá region had the highest average production estimated at 15.736 kg ms ha⁻¹. The potential sites identified for the establishment of the madi species were quantified 7.240.451ha disposed from the Atacama region to the Los Lagos region, 4.815.900ha classified optimal land, 1.852.062ha Fit and 572.489ha with marginal. The Coquimbo region had the highest surface potential for the establishment of madi with 1.268.048ha equivalent to 31,3% of the regional area. The productive capacity for madi species was estimated at 12.758kg ms ha⁻¹ for all agroecological potential area where the Maule region had the highest average production estimated at 1.612kg ms ha⁻¹.

The investigation concluded that agroecological zoning of madi and chañar species represent a reliable development for cultivable species for bioenergy purposes where the most reliable regions for cultivation are Coquimbo and Maule approach.

Agroecological zoning, GIS, biofuels, energy crops.

ABREVIATURAS

GEI	Gases de Efecto Invernadero
CNE	Comisión Nacional de Energía
INE	Instituto Nacional de Estadística
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
ODEPA	Oficina de Estudios y Políticas Agrarias
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
CO ₂	Dióxido de Carbono
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
ERNC	Energía Renovable No Convencional
USDA	United States Department of Agriculture
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
DS	Decreto Supremo
DMC	Dirección Meteorológica de Chile
DEM	Digital Elevation Model
MDT	Modelo Digital de Terreno
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
CONAF	Corporación Nacional Forestal
ASPP	Áreas Silvestre Protegidas Privadas
ZAE	Zonificación Agroecológica
GIS	Geographic Information System
IUSS	International Union of Soil Sciences
SAG	Servicio Agrícola y Ganadero
SIC	Sistema Interconectado Central

WGS	World Geodetic System
UTM	Universal Transversal Mercator
EAT	Modelo de Evaluación de Aptitud de Tierra
UMC	Unidad Mínima Cartografiada
FT	Función Térmica
FH	Función Hídrica
ETP	Evapotranspiración
EURS	Eficiencia en el Uso de la Radiación Solar
PCS	Producción potencial de biomasa en condiciones de secano
TMA	Temperatura Media Anual
TMmín	Temperatura Media Mínima
TMmáx	Temperatura Media Máxima
Tmín	Temperatura Mínima
Tmáx	Temperatura Máxima
Pp anual	Precipitación Media Anual
Sal	Salinidad
Inu	Inundación
Seq	Sequía
Hel	Helada

Unidades de Medición

ML	Millones de Litros
Mml	Mil Millones de Litros
Mb d ⁻¹	Miles de barriles al día
ms ha d ⁻¹	Materia seca por hectárea al día
m ³	Metros cúbicos

ha	Hectárea
MM	Millones
L	Litros
MJ/L	Megajoule por Litro
Kcal /Nm ³	Kilocalorías por metro cúbico en condiciones normales
MW	Megawatss
Kg	Kilogramo
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetros
°C	Grados Celsius

INTRODUCCIÓN

La dependencia de combustibles fósiles para satisfacer la demanda energética se ha transformado en un problema generalizado a nivel mundial (Urrutia, 2010; Miller y Spoolman, 2012). El petróleo, el carbón y el gas natural al 2008 proveían el 60% de la generación de energía eléctrica primaria, las estimaciones realizadas por el Departamento de energía de Estados Unidos propone reservas de petróleo factibles de explotar cercanas a 1.320 billones de toneladas permitiendo 40 años de disponibilidad con el consumo actual, se proyecta que al 2030 estas fuentes surtan el 85% del suministro eléctrico mundial aumentando el consumo, reduciendo las reservas y los tiempos estimados de disponibilidad, junto al incremento en la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) (CNE, 2008; INIA, 2009; Ministerio de Energía, 2011a; Ministerio de Energía, 2012a). La acumulación de GEI generó un aumento de 0,3 a 0,6°C en las temperaturas medias globales del planeta para un período de 100 años y se estima que para el 2100 el incremento pueda alcanzar los 1,4°C a 5,8°C acarreado desequilibrios en los sistemas ambientales (IPCC, 2007; INIA, 2009). El precio del petróleo ha experimentado aumento sostenido en el tiempo desde los años setenta donde el valor promedio era de US\$15 se ha incrementado a US\$20 – US\$30 el barril en el 2004 a US\$100 en el 2008 y la tendencia futura es al alza, afectando con mayor fuerza a países dependientes de este combustible, acarreado crisis financieras y conflictos geopolíticos. (Caballero, 2001; CNE 2008; Velásquez *et al.*, 2009; Ministerio de Energía, 2011a y Ministerio de Energía, 2012a).

Chile es un país dependiente del petróleo donde el consumo de energía se distribuye en cuatro sectores: minero, industrial, transporte y comercial-público-residencial (CNE, 2008; Ministerio de Energía, 2011a; Ministerio de Energía, 2012a). Según datos del Ministerio de Energía de Chile para el 2008 el petróleo fue el combustible dominante en la matriz energética primaria con un 44%, seguido de la leña 20%, carbón 18% y gas natural 10% (CNE, 2008; Hermansen, 2010; Ministerio de Energía, 2011b). La cantidad de petróleo generada en el país ($4,8\text{Mb d}^{-1}$) satisface solo un 2% de la demanda nacional, el 98% restante es importado de países como Angola, Turquía y países sudamericanos (CNE, 2008; Paneque *et al.*, 2011; IEA, 2012a). Dentro de los cuatro sectores de mayor demanda energética el transporte es el principal consumidor de combustible en base a petróleo utilizando el 60,7% de petrodiesel (CNE, 2008; Ministerio de Energía, 2011a; IEA, 2012b; Ministerio de Energía, 2012a). El petrodiesel o comúnmente denominado solo diesel es un gasóleo compuesto mayoritariamente de parafinas obtenido del petróleo a través de un proceso de destilación atmosférica o destilación primaria (Wauquier, 2004).

La dependencia energética de Chile y el aumento proyectado en el precio del barril de crudo ha posicionado de forma prioritaria la necesidad de diversificación de la matriz energética (CNE, 2008). El uso y la aplicación de nuevas fuentes de energía es una propuesta orientada a reemplazar la utilización de los derivados del petróleo y contribuir a una menor tasa de acumulación de contaminantes en el ambiente, estas son las denominadas energías renovables donde los cultivos energéticos es una de las alternativas

para la generación de biocombustibles que sustituyan a los derivados del petróleo (Benavides *et al.*, 2007; Masiero y López, 2008).

El desarrollo de biocombustibles a nivel mundial se sustenta en el uso de terrenos que poseen capacidad agrícola y desarrollo de cultivos energéticos, para obtener materias primas para abastecer la industria bioenergética (González *et al.*, 2008a). Un efecto negativo al sustituir terrenos de producción agrícola por producción de cultivos energéticos es la reducción de fuentes alimentarias, generando dificultades económicas y sociales. La disminución de los terrenos productivos, o agrícolas, reduce la oferta de alimentos, y genera alzas en los precios de alimento, y como consecuencias aumenta la brecha entre sectores socioeconómicos altos y sectores marginados (González *et al.*, 2008a).

La utilización de cultivos energéticos de segunda generación, como materia prima para la elaboración de biocombustibles, es una alternativa al desarrollo tradicional. Los cultivos energéticos de segunda generación utilizan suelos marginados, con propiedades físicas y químicas no aptas para el cultivo de especies alimentarias, por lo cual no compiten con la industria alimentaria (González *et al.*, 2008a). Los cultivos energéticos son especies vegetales destinadas a la producción de biomasa y pueden clasificarse según el producto que generan (IDEA, 2007). Se denominan cultivos oleaginosos a los que se utilizan para la producción de aceites transformables en biodiesel (González *et al.*, 2008a), cultivos alcoholígenos los que son ricos en azúcar que al fermentar produce el alcohol destinado a bioetanol (IDEA, 2007) y por último cultivos lignocelulósicos para la generación de biomasa sólida utilizada en la industria de generación térmica, fabricación de pellets, entre otras (IDEA, 2007; Ossa, 2012).

Se han descrito más de 130 especies con potencial para producir bioenergía en Chile (Paneque *et al.*, 2011; Román *et al.*, 2012) de ellas destacan para la producción de semillas para biodiesel a las especies: maravilla (*Helianthus annuus*), raps o canola (*Brassica napus*), cacahuete (*Arachis hypogaea* L.), chontaduro (*Bactris gasipaes* Kunth), calabaza aceitera o italiana (*Cucurbita pepo* L.), olivo (*Olea europaea* L.), palto (*Persea americana* Mill.) y en especial las especies nativas como chañar (*Geoffroea decorticans* (Gill. ex Hook. et Arn.) Burk) y madi (*Madia sativa* Mol.) (Paneque *et al.*, 2011; Román *et al.*, 2012).

El chañar es un árbol caducifolio de la familia *Fabaceae*, que se encuentra distribuido en Sudamérica abarcando países como Perú, Bolivia, Uruguay, Argentina y Chile. En Chile la distribución del chañar abarca desde la I hasta la IV Región (Rodríguez *et al.*, 1983; García y Ormazábal, 2008), y se desarrolla en terrenos áridos y desérticos que en general se caracterizan por ser suelos marginales y degradados ((Maestri *et al.*, 2001; Maestri *et al.*, 2002)). Las semillas de chañar poseen entre 45,9% y 48,8% de aceite, superior a los contenidos de aceite de las semillas de jatropha (*Jatropha curcas*) 28 a 39,1% de aceite y soja (*Glycine max*) 20 a 27%, utilizadas para la fabricación de aceite para biodiesel a nivel comercial (Maestri *et al.*, 2001; Maestri *et al.*, 2002; Román *et al.*, 2012). El aceite de chañar posee un 83% de ácidos grasos insaturados lo cual otorga al biodiesel generado a partir de este aceite una mayor calidad y rendimiento de producción (Lamarque *et al.*, 2000; Maestri *et al.*, 2001; Maestri *et al.*, 2002; Santibáñez, 2011; Román *et al.*, 2012). Los altos contenidos de aceites en las semillas y los elevados porcentajes de ácidos grasos permiten

al chañar ser considerado como una fuente confiable para la producción de aceite para biodiesel de alta calidad (Lamarque *et al.*, 2000; Maestri *et al.*, 2001; Maestri *et al.*, 2002).

El madi, es una especie herbácea anual procedente de zonas templadas de Norteamérica y Sudamérica (Celedón-Neghme *et al.*, 2007). En Chile se distribuye ampliamente dentro de los bosques mediterráneos en altitudes altas y medias, desde la Región de Coquimbo a Magallanes (Raven, 1963; Donoso, 1982; Zardini, 1992). Las semillas de madi pueden alcanzar concentraciones de aceite (26 - 40%) similares a las semillas de maravilla (*Helianthus annuus*) 25 a 50% y raps (*Brassica napus*) 40 a 45%, cultivos reconocidos para la generación de aceite para biodiesel (Zardini, 1992; Schmeda-Hirschmann, 1995; Angelini *et al.*, 1997; Román *et al.*, 2012).

El presente trabajo de investigación identifica las áreas con potencial aptitud agroecológico y productivo para el establecimiento de las especie chañar y madi en Chile y estima la superficie disponible para el establecimiento de ambas especies en función de sus capacidades de adaptación.

Objetivo general

Identificar áreas potenciales para el establecimiento de las especies chañar (*Geoffroea decorticans* [Gill. ex Hook. et Arn.] Burk) y madi (*Madia sativa* Mol) con fines bioenergéticos en Chile.

Objetivo específico

Definir y zonificar mediante variables agroecológicas y productivas el área potencial de establecimiento y de aptitud productiva, de las especies chañar y madi.

ESTADO DEL ARTE

Biocombustibles

Los biocombustibles o biocarburantes son recursos energéticos elaborados a partir de materia vegetal denominada biomasa, y pueden encontrarse en forma líquida, gaseosa o sólida (Maciel, 2009). De acuerdo al origen de la biomasa para la producción de biocombustible y a los avances tecnológicos necesarios para obtenerlo, estos puede clasificarse de primera, segunda, tercera o cuarta generación (Maciel, 2009; Paneque *et al.*, 2011).

Los biocombustibles de primera generación son elaborados a partir de especies tradicionales destinadas a la alimentación como trigo, caña de azúcar, maíz, soja y palma aceitera, levantando preocupaciones referentes al uso de la tierra (Maciel, 2009). Los de segunda generación utilizan residuos de la industria agrícola y forestal, así como especies que no compiten con la producción de alimentos y utilizan suelos marginales y/o degradados (Maciel, 2009). Los biocombustibles de tercera generación utilizan como insumo especies de pastos, arboles y algas alteradas genéticamente para otorgar al individuo características de rápido crecimiento, resistencia y alta densidad energética, también plantean el inconveniente de utilizar tierras cultivables compitiendo con los fines alimentarios de la población (Maciel, 2009). Los de cuarta generación son aquellos que utilizan bacterias genéticamente modificadas, las cuales utilizan el anhídrido carbónico (CO₂) u otra fuente de carbono para la generación del biocombustible, a diferencia de las generaciones anteriores donde también es posible emplear bacterias y organismos modificados genéticamente, en esta generación la bacteria es quien efectúa la totalidad del proceso de producción, esta generación es teórica y se estudia la aplicación para la obtención de etanol (Maciel, 2009).

El mercado de biocombustible es relativamente nuevo y limitado donde gran parte de la producción se emplea en solventar la propia demanda interna de los países productores (CEPAL, 2009). Actualmente, el mercado se ve impulsado por los elevados precios del petróleo y las políticas de subvención públicas a nivel nacional, adoptadas para cumplir los protocolos internacionales (IICA, 2007; IICA, 2010). El continente americano concentra más del 95% de la producción de bioetanol, este mercado fue el primero de los biocombustibles en expandirse al mundo, seguido por el biodiesel donde la Unión Europea es el principal productor (IICA, 2007; IICA, 2010). EE.UU., Brasil y Alemania son los países que aglutinan más de la mitad de la producción de biodiesel y más de las tres cuartas partes de la producción de bioetanol (IICA, 2007; IICA, 2010). Desde el año 2000 la producción de biocombustibles a crecido a un ritmo anual del 10% y se estimo que durante el año 2009 se alcanzó un producción de biocombustibles total de 90.187 millones de litros, donde el 82% correspondió a bioetanol y el 18% a biodiesel (CEPAL, 2011). Las especulaciones en este mercado sostienen que la producción de bioetanol y biodiesel se incrementaran al doble de su producción actual con una tasa acumulativa de crecimiento anual entre el 2009 al 2020 de 10,1% con un volumen estimado de producción de 45.291 millones de litros al 2020 (IICA, 2007; IICA, 2010).

i. Biodiesel

El biodiesel es la denominación para el biocombustible líquido derivado de la reacción de lípidos naturales como los aceites vegetal o las grasas animales con alcohol (principalmente metanol) mediante un proceso de transesterificación (González *et al.*, 2008a; IICA 2010). Este proceso involucra la sustitución del grupo alquilo del éster por otro grupo a partir de la interacción entre el éster y el alcohol, obteniendo biodiesel y glicerol (González *et al.*, 2008a; IICA 2010). El biodiesel obtenido posee un poder calorífico de 37,27 MJ/L, lo cual es un 9% menor al poder calorífico del diesel convencional, el proceso no ocurre a temperatura ambiente implicando la ayuda de ácidos o bases como catalizadores para que ocurra la reacción química (González *et al.*, 2008a; IICA 2010).

ii. Bioetanol

El bioetanol es producto de la fermentación de la sacarosa o azúcares contenidos en las especies vegetales mediante la acción microbiana (Demirbas, 2005; Gray *et al.*, 2006; IICA, 2010). Los insumos tradicionales para su elaboración son caña de azúcar y remolacha por poseer altos contenidos de sacarosa, otra alternativa es el maíz y el trigo por sus altos contenidos de almidón, polisacárido que debe ser hidrolizado para la obtención de los azúcares utilizados en el procesos de producción de bioetanol (Demirbas, 2005; Gray *et al.*, 2006; IICA, 2010).

iii. Biogás

El biogás está compuesto de metano 50-60%, dióxido de carbono 40-50% y trazas de otros elementos, derivado de la descomposición del material vegetal o animal por la acción microbiana en condiciones anaeróbicas (Pascual *et al.*, 2011; Ministerio de Energía, 2011c). La materia orgánica sometida a procesos químicos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, generará biogás. El biogás tiene un poder calorífico aproximado de 4166kcal/Nm³, y variará dependiendo del tipo de materia prima que se utilice de sustrato, además de características de humedad, temperatura, y la tasa de degradación (Pascual *et al.*, 2011; Ministerio de Energía, 2011c). Como subproducto del proceso de obtención del biogás se produce el bioabono, de alto contenido de nitrógeno, utilizado como fertilizante por la industria agropecuaria (Pascual *et al.*, 2011; Ministerio de Energía, 2011c).

Los biocombustibles en el mundo

La producción de biocombustibles se ve impulsada por el alza en los combustibles convencionales, las políticas nacionales que subsidian producciones alternativas a las tradicionales y por la reducción de GEI que implicaría sustituir a los combustibles fósiles en el área de transportes (Serna *et al.*, 2011). El biodiesel y el bioetanol son los biocombustibles consolidados en el mercado mundial, siendo este último el que representa más del 90% de los biocombustibles utilizados al 2011 (Serna *et al.*, 2011). En el continente Americano los mayores productores de biocombustibles son EE.UU.

produciendo 34.962 millones litros (ML) de bioetanol al 2008 y 2.585ML de biodiesel, y Brasil produciendo 21.300 ML de bioetanol y 730ML de biodiesel al 2007, seguidos de Canadá 800ML en 2007, Colombia 284ML, El Salvador 277ML, Costa Rica 149ML, Perú 30ML, Argentina 20ML y Paraguay 18ML (Maciel, 2009). En Asia los mayores productores de biocombustibles específicamente bioetanol son China con 1.840ML al 2007, Tailandia con 300ML, India 250ML, Turquía 60ML y Paquistán 35ML, otros productores de bioetanol son Japón, India y Filipinas (Maciel, 2009). Los grandes productores de biodiesel en este continente son Indonesia con 760 ML en 2007, China 338 ML y Malasia 150ML (Maciel, 2009). Otros países productores de biodiesel en Asia son Filipinas, Japón, Tailandia e India (Maciel, 2009). En el continente Europeo se produce biodiesel, bioetanol y biogás, Alemania encabeza la lista para los productores de biodiesel con 3.255ML en 2007 seguida de Francia 982ML, Italia 409ML, Austria 301ML, Portugal 197ML, España 189ML, Bélgica 187ML, entre otros (Maciel, 2009). Francia encabeza la lista en los productores de bioetanol con 539ML, seguida de Alemania 394ML, España 348ML, Polonia 155ML, Suecia 70ML y otros (Maciel, 2009). Los principales productores de biogás en Europa son Alemania y Reino Unido (Maciel, 2009).

El 88% de la producción mundial de bioetanol se concentra en América específicamente en EE.UU. en base a maíz y en Brasil basada en la caña de azúcar, mientras que el continente europeo acumula un porcentaje similar para la producción de biodiesel (Serna *et al.*, 2011). Brasil encabezaba la producción de bioetanol hasta el año 2005, siendo sobrepasado desde el 2006 por EE.UU. año en el cual la producción generó 18.813ML mientras que la demanda alcanzó los 20.837ML (CEPAL, 2008; CEPAL, 2011). Al 2010 EE.UU. produjo 45.400ML equivalentes al 54,7% de la producción global de bioetanol (CEPAL, 2011). Brasil debido a su amplio territorio posee potencial para la expansión de la oferta de bioetanol (CEPAL, 2008). Se estima que para el 2017 Brasil desarrolle un incremento de la producción en 20,9 millones de m³ y la producción europea de etanol basado en trigo, cereales y remolacha aumente en casi 16,5Mml al 2020, además se espera que el etanol de segunda generación también aumente llegando a 1,6Mml al mismo año (CEPAL, 2008; OCDE, 2011).

Las principales cultivos energéticos o materias primas utilizados en la producción de bioetanol son la caña de azúcar con un 36% y el maíz con un 58% de la producción total (CEPAL, 2011). Países como Brasil, Tailandia, Colombia e India utilizan la caña de azúcar para la producción y países como EE.UU., China y Canadá usan maíz (CEPAL, 2011). Estos cultivos se complementan en países de climas templados con el uso de remolacha, cebada, trigo y residuos vinícolas (CEPAL, 2011). En países de clima tropical la caña de azúcar es complementada con cultivos de alto contenido de azúcar como la yuca y el sorgo dulce (CEPAL, 2011).

Según cifras del Global Biofuels Center para el año 2010 los países que lideraban la producción de bioetanol eran EE.UU con 51.415ML seguido de Brasil 26.887ML, en el cuadro 1 se muestra el ranking de los 25 países productores de bioetanol al 2010 (Torres y Carrera, 2010).

Cuadro 1: Ranking de los 25 países productores de bioetanol al 2010

N°	País	Producción (ML)	N°	País	Producción (ML)
1	EE.UU.	51.415	13	España	546
2	Brasil	26.887	14	Austria	485
3	China	2.699	15	Bélgica	485
4	Francia	1.821	16	Países Bajos	480
5	Canadá	1.494	17	Reino Unido	470
6	India	1.420	18	Islas Vírgenes	387
7	Polonia	1.079	19	Colombia	352
8	Alemania	916	20	Vietnam	318
9	Tailandia	868	21	Australia	292
10	Jamaica	832	22	República Checa	280
11	Trinidad y Tobago	757	23	El Salvador	247
12	Indonesia	683	24	Paraguay	237
			25	Argentina	237
				Total	95.694

Fuente: Torres y Carrera (2010) en base a datos del Global Biofuels Center.

El comercio de bioetanol es limitado por las cantidades de los biocombustibles que entran en el mercado, cerca del 10% de la producción mundial se comercializa en el mercado internacional (CEPAL, 2011). El principal exportador de bioetanol es Brasil con más del 90% de participación basa su producción en la caña de azúcar (CEPAL, 2009), destinando cerca del 15% de su producción a los mercados externos (CEPAL, 2011). Otros países exportadores son China, La Unión Europea, Pakistán, Perú, Ucrania, Zimbabwe y Suazilandia (CEPAL, 2011). Importante señalar que las exportaciones de los países de la Unión Europea se destinan para satisfacer la demanda de otros países Europeos (CEPAL, 2011). Se estima que las exportaciones de Brasil alcancen los 9.7Mml al 2020, las exportaciones de Tailandia también crecerán alcanzando los 0,5Mml mientras que la Unión Europea disminuirá su exportación a 2,3Mml para cubrir su propia demanda en los primeros años (OCDE, 2011). El principal importador de bioetanol es la Unión Europea concentrando el 28%, otros importadores de este biocombustibles son EE.UU., Canadá y Japón (CEPAL, 2011).

La producción de biodiesel en el continente europeo es liderada con un 49,8% de la producción total, por Alemania, quien produce el 50% de la Unión Europea, seguido de Italia 14%, Francia 13%, Inglaterra, 7%, España 4%, República Checa 3% y otros como Malasia y Suecia (Lecaros y Morales, 2006; ODEPA, 2007; CEPAL, 2008; CEPAL, 2011). Al continente Europeo le sigue el continente Americano con un 33% liderando EE.UU., Brasil y Argentina (Torres y Carrera, 2010).

Los cinco principales países productores de biodiesel a nivel mundial son Alemania, EE.UU., Francia, Argentina y Brasil que en su conjunto producen el 68,8% del total global

(Torres y Cabrera, 2010). Sin embargo según datos del Global Biofuels Center al 2010 la producción de biodiesel fue encabezada por EE.UU. con 5.912ML seguido de Alemania y otros países, el ranking de los 25 mayores productores de biodiesel al 2010 se muestra en el cuadro 2 (Torres y Carrera, 2010).

Cuadro 2: Ranking de los 25 países productores de biodiesel al 2010

N°	País	Producción (ML)	N°	País	Producción (ML)
1	EE.UU.	5.912	13	Polonia	1.505
2	Alemania	5.047	14	Países Bajos	1.124
3	España	5.023	15	Singapur	988
4	Indonesia	4.262	16	Austria	982
5	Brasil	4.160	17	Reino Unido	970
6	Malasia	4.091	18	Bélgica	886
7	China	3.906	19	Grecia	850
8	Argentina	3.636	20	Australia	797
9	Francia	2.926	21	Corea del Sur	762
10	Tailandia	2.771	22	Portugal	590
11	Italia	2.749	23	Colombia	584
12	India	1.715	24	Filipinas	478
			25	República Checa	459
				Total	57.184

Fuente: Torres y Carrera (2010) en base a datos del Global Biofuels Center.

Las principales cultivos energéticos o feedstocks utilizados en la producción de biodiesel son la soja, palma, raps y girasol (CEPAL, 2008). En la Unión Europea el cultivo tradicional ha sido el raps y la soja incluyendo también aceites de girasol y palma (CEPAL, 2011). En EE.UU., Brasil y Argentina el cultivo preferido para la producción de biodiesel es la soja, cultivo que baraca el 40%, 80% y 100% respectivamente de la producción de cada país (CEPAL, 2011). La palma aceitera se utiliza en países como Indonesia, Malasia, Tailandia y Colombia debido a su contenido energético (CEPAL, 2011). Otras especies experiencias son con el uso de aceite de coco en sudeste asiático y con jatropha en África, India, Argentina, Guatemala, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay (CEPAL, 2011).

La producción de biodiesel comparada con la de bioetanol es más reducida siendo esta nueve veces menor (CEPAL, 2008). Las estimaciones previstas para el mercado del biodiesel sugieren que el crecimiento surgirá por parte de EE.UU. y el continente americano, los países europeos presentarán restricciones orientadas a la escasas de disponibilidad de terrenos agrícolas para el cultivo de especies energéticas (CEPAL, 2008).

Actualmente el mayor consumidor de biodiesel son los países de la Unión Europea y por ende el principal importador de biodiesel, estos países importan aceite de raps de la zona del Mar Negro, aceite de soya desde Argentina, Brasil y EE.UU., y aceite de palma desde Malasia (CEPAL, 2011). El principal exportador neto de biodiesel es Argentina con el 58%

de las exportaciones, en cambio en exportaciones de aceite de soja cae al tercer puesto después de EE.UU y Brasil (CEPAL, 2011). Cabe señalar que las importaciones de aceite de soja solo Brasil y Argentina exportan para fines industriales y alimenticios mientras que EE.UU. exporta solo con fines alimentarios (CEPAL, 2008).

Al 2020 se estima que el producción de biodiesel proveniente de aceite vegetal equivalga al 75% de la producción y que un 10% sea producido utilizando tecnología de segunda generación (OCDE, 2011). Se espera que Argentina se convierta en el exportador de biodiesel a partir de aceite de soya, más importante a nivel mundial con 2,5Mml al 2020 seguido de Malasia y Colombia, la expectativa es que este mercado no crezca en demasía debido a que los países obligados a incorporar biodiesel en sus combustibles generen una producción interna (OCDE, 2011). Al 2020 la soja y la palma se mantendrán como materias primas dominantes para la producción de biodiesel, esperando que la producción de aceite proveniente de jatrofa curca prospere y la producción de aceite de canola se limite por las condiciones climáticas (OCDE, 2011). Al mismo año se proyecta que el uso total de biodiesel en la Unión Europea aumente en un 85% llegando a los 20Mml, siendo un 70% mayor el uso que durante el periodo 2008-2010 con lo cual la oferta de biodiesel para satisfacer la demanda también crecerá (OCDE, 2011).

Biocombustibles en Chile

En Chile la producción de biocombustibles no se encuentra masificada y son empresas puntuales las que producen biodiesel, bioetanol y biogás para uso particular y científico (Arriaza, 2010). Los principales consorcios en materia de biocombustibles que estudian y analizan la introducción de estos biocombustibles al mercado nacional son BIOCOTSA, BIOENERCEL, ALGAEFUEL, DESERT ENERGY y BAL BIOFUELS (Ruiz, 2009; Arriaza, 2010). La producción de biocombustibles de primera generación en el país no es la opción más factible a desarrollar al competir con el uso de terrenos agrícolas destinados a fines alimenticios, en cambio, utilizar terrenos marginales con diversos grados de erosión imposibilitados para el desarrollo agrícola con fines alimenticios implica una alta potencialidad de elaboración de biocombustibles líquidos de segunda generación (Ruiz, 2009).

El aumento en los precios de los combustibles fósiles, el agotamiento de los recursos del petróleo, la contaminación asociada al uso de estos combustibles son las principales razones para impulsar la producción de biocombustibles, debido a que casi el 100% de la energía destinada a transporte se encuentra basada en petróleo (Arriaza, 2010). Chile se ha propuesto impulsar la diversificación de la matriz energética, en los últimos años han existido hitos en materia energética que tienen la finalidad de avanzar en la diversificación de la matriz (Arriaza, 2010). La modificación a la Ley 20.257 introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC), en ella se dejaba estipulado que las empresas que sobrepasen los 200MW de capacidad instalada deberían comercializar un 10% de la energía de fuentes de ERNC al 2024, con la nueva modificación se redujo el

plazo al 2020 y el porcentaje de energía aportado de fuentes ERNC aumentó al 20%, esta modificación se denominó proyecto de ley 20/20 y actualmente se encuentra aprobada por la cámara de diputado (ACERA, 2012). En la misma línea, el Ministerio de Energía desarrolla y publica la Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2030 proponiendo aumentar la competitividad en el mercado de energía y disminuir los costos asociados a la misma, buscando nuevas fuentes de generación energética (Ministerio de Energía, 2012b). Dentro del marco regulatorio en materia específica de biocombustibles, en el 2008 se creó la comisión asesora interministerial en materia de biocombustibles, se autoriza el uso de biocombustibles en vehículos motorizados mediante el DS11/08, especificando las mezclas de gasolina con bioetanol de 2% o 5% y de petróleo diesel con biodiesel al 2% o 5% (Ruiz, 2009). El circular N°30 del Servicio de Impuesto Internos exime del pago del impuesto específico al bioetanol y biodiesel (Ruiz, 2009). La resolución exenta N°746 de la Superintendencia de electricidad y combustible fija norma técnicas para el análisis y/o ensayos con bioetanol y biodiesel (Ruiz, 2009). En el 2008 se establecieron las líneas de trabajo en materia energética teniendo por objetivo evaluar las alternativas para incorporar las energías renovables en el sector transporte, generar la información para el desarrollo de políticas asociadas a la producción y al impacto en la calidad del aire, asegurar la neutralidad regulatoria a los biocombustibles y el apoyo a la formación de capacidades I+D (Ruiz, 2009).

Los principales biocombustibles utilizados y/o estudiados en el país son la leña, el biodiesel, etanol y biogás (Paneque *et al.*, 2011; Ossa, 2012). La leña es el principal biocombustible utilizado en todo el país mayoritariamente en la zona sur desde la Región del Maule hasta la Región de Aysén para uso residencial e industrial con un 17,6% de participación en la matriz energética (Ministerio de Energía, 2011a; Paneque *et al.*, 2011).

El etanol es un biocombustible que se obtiene de la fermentación de biomasa, en el país se encuentra en etapa de investigación evaluando las alternativas de producción existentes, actualmente los estudios se han centrado en los altos niveles de producción arrojando como resultado etanol de primera generación con especies como el maíz, el trigo y el arroz (Masiero y López, 2008; Paneque *et al.*, 2011). Dentro de los proyectos que buscan la producción de etanol encontramos “The South Pacific Inc.” perteneciente al consorcio denominado Ethanol mediante la asociación con pequeños y medianos agricultores de la comuna de Las Cabras, Región de O’Higgins, pretenden producir etanol utilizando maíz como materia prima (Paneque *et al.*, 2011). Se estima que su producción llegará a los 36.556 m³ de etanol con 98.800.000Kg de maíz en 8.000ha de cultivo (Paneque *et al.*, 2011). Estudios para la generación de etanol de segunda generación han sido elaborados por Schneuer (2010), utilizando residuos del maíz, Sotomayor (2010) basado en los residuos de eucalipto y Acuña *et al.* (2010) utilizando los residuos de plantaciones de pino radiata, este último concluyó que se podría abastecer al 38% de la demanda interna del país utilizando los residuos de plantaciones forestales (Acuña *et al.* 2010).

El biodiesel es un biocombustible de gran importancia al ser utilizado como sustituto del diesel (Masiero y López, 2008). El clima templado del país otorga potencial de cultivo de especies oleaginosas como el raps y la maravilla, ambas cultivos energéticos reconocidos

para la elaboración de aceite vegetal (Paneque *et al.*, 2011). Existen ocho industrias productoras de biodiesel en Chile, destacando a FAME de Pullman Bus y Planta Industrias Grasas y Aceites Ltda., la primera emplea aceite de cocina reciclado, mientras que la segunda utiliza aceites y grasas recicladas (Paneque *et al.*, 2011). Otras plantas de producción de biodiésel son: Biodiésel Chile S.A., quien pretende producir 50 m³ de biodiésel por mes utilizando aceite de higuera, Biodiésel Austral S.A. y Biodiésel Sur S.A. (las tres plantas pertenecen al mismo grupo empresarial), Planta Matadero en Concepción, Bioengine en Puente Alto, Preseco S.A. en Las Condes y la planta artesanal de la Dirección de Gestión Ambiental (DIGA) de la Municipalidad de La Pintana (Paneque *et al.*, 2011). Instituciones educacionales como universidades y centros técnicos han desarrollado estaciones experimentales y estudios de producción de aceite en base a semillas de raps, jatrofa, camelina, guindilla y mostaza, uno de ellos perteneciente a la Universidad de La Frontera en conjunto con el Molino Gorbea y Copec, pretende producir 241.000L biodiésel por año empleando aceite de raps (Paneque *et al.*, 2011). Los consorcios Biocomsa s.a., Desert Energy s.a. y Algafuels s.a. por medio de fondos de inversión se encuentran desarrollando proyectos productivos para biodiesel de segunda y tercera generación utilizando como materia prima residuos lignocelulósicos y aceite de microalgas (Paneque *et al.*, 2011).

El biogás producido mediante digestión anaeróbica utiliza cualquier tipo de residuo orgánico, en el país los desechos pueden llegar hasta los 2.000MM m³ año⁻¹ siendo los plantales de animales los de mayor aporte al potencial productivo (Paneque *et al.*, 2011). Los rellenos sanitarios es el lugar donde llegan habitualmente los desechos domiciliarios, el relleno KDM de la Región Metropolitana emplea un sistema de tuberías para captar el biogás generado y lo inyectan al Sistema Interconectado Central (SIC) como electricidad (Paneque *et al.*, 2011).

Especies energéticas para la producción en Chile

Los cultivos energéticos hacen referencia a cultivos agrícolas con potencial energético lo ideal es que poseen características de rápido crecimiento, elevada producción de biomasa con bajos costos de producción, resistentes a condiciones climáticas adversas, adaptabilidad a las condiciones edafo-climáticas donde se cultiven, que en lo posible no posean un aprovechamiento alimenticio, de fácil manejo con mínimas necesidades nutricionales y de balance energético positivo, es decir, que se obtenga mayor energía del que se invierte en el cultivo (IDEA, 2007). El desarrollo de cultivos energéticos tiene ventajas sociales, medioambientales y económicas, ofrecen una nueva alternativa de cultivo para aquellos agricultores de terreno en los cuales el cultivo tradicional no es rentable, se aprovechan las tierras agrícolas que eventualmente pasan a ser abandonadas por una erosión excesiva, reducen las emisiones de CO₂ y proporcionan alternativas al uso de combustibles fósiles (IDEA, 2007).

Las especies agro-energéticas tradicionalmente utilizadas por los países productores de biocombustible son caña de azúcar, remolacha azucarera, maíz y trigo para la obtención de

azúcares con los cuales generar etanol, en cuanto a las especies utilizadas para la obtención de aceite para biodiesel son girasol, soja, palma aceitera, colza, jatropha y ricino (CEPAL, 2011). Se sabe que cultivos como la soja, girasol, remolacha, caña de azúcar y colza son especies que desarrollan gran cantidad de biomasa en poco tiempo, pero requieren un mayores cuidados debido a sus altos requerimientos nutricionales con uso frecuente de fertilizantes y pesticidas (IDEA, 2007).

En el país existen cultivos con potencial energético con los cuales poder producir bioetanol y biodiesel pero todos ellos son destinados a la producción de alimentos (Paneque *et al.*, 2011). En Chile se cultivan especies como el maíz, que posee 85% de azúcares en su composición y el trigo, con 71% de azúcares (Paneque *et al.*, 2011). Según datos de VII censo agropecuario y forestal desarrollado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el 2007 en el país se cultivan 228.324ha de trigo, 102.955ha de maíz y también se tienen 21.579ha de arroz y 19.515ha de remolacha, el maíz es la opción más viable por sobre las otras especies en la producción de etanol por el menor costo energético y de producción (INE, 2006; Paneque *et al.*, 2011). Para la producción de biodiesel, en el país se siembran uvas con semillas que poseen entre un 6 a 20% de aceite, paltos con 12,7 a 34,8% de aceite siendo esta una de las 10 especies oleaginosas de mayor productividad alcanzando los 2.500L aceite ha⁻¹, y olivos con 20 a 30% aceite en su semillas (Paneque *et al.*, 2011). Otras especies que se pueden utilizar para generación de biodiesel de segunda generación son la guindilla con un 38% de aceite en sus semillas, especie nativa que se distribuye desde la Región de Valparaíso hasta la Región del Maule, otra especie a considerar es la camelina con 39,8 a 45,4% de aceite en sus semillas y rendimientos de 420 - 2.314 Kg ha⁻¹ de semillas (Paneque *et al.*, 2011). Otras especies poco estudiadas para la producción de biodiesel son el chañar y el madi, especies nativa que pueden utilizarse como cultivos energéticos.

i. Chañar

Geoffroea decorticans [Gill. ex Hook. et Arn.] Burk es un árbol caducifolio de la familia Fabaceae género *Geoffroea* (Silva *et al.*, 2004; García y Ormazábal, 2008). También es conocido con el nombre común de “Chañar”, “Chañarcillo” o “Quimori”, posee un tronco tortuoso ramificado, de corteza lustrosa color verde, gris y amarillenta, que se desprende sin dificultad, formando fajas y dejando al descubierto la nueva corteza (Silva *et al.*, 2004; García y Ormazábal, 2008). Crece en solitario y presenta un fuste erguido, que puede alcanzar los 12 metros y 60cm de diámetro (Silva *et al.*, 2004; García y Ormazábal, 2008). En crecimiento arbustivo desarrolla pequeños bosques denominados chañarales, con follaje abundante, de color verdoso, y con ramas intrincadas y espinosas (García y Ormazábal, 2008). Las hojas son de crecimiento alternado o fasciculadas, compuestas pinadas, con pecíolo y raquis glabros, compuestas de 3 a 9 folíolos subcoriáceos, sésiles o subsésiles, oblongos a elípticos oblongos (Silva *et al.*, 2004).

El fruto del Chañar corresponde a una drupácea, drupa ovoide de consistencia dulce, pulposa de color rojizo y glabra derivada de la reducción de una legumbre (Silva *et al.*, 2004; Dicek, 2011). Las dimensiones del fruto oscilan entre los 20 a 25mm de largo con un epicarpio que varía de liso a rugoso de color amarillo anaranjado, mesocarpo carnoso de

textura granulosa a fibrosa y el endocarpo esclerificado con 1 a 2 semillas fusiformes (Silva *et al.*, 2004). La semilla de forma fusiforme curvada, color marrón claro y estrías transversales suele medir de 10 a 12mm (Silva *et al.*, 2004). La floración contempla los meses de septiembre y octubre fructificando desde noviembre hasta abril, se recomienda su cosecha para los meses de diciembre y principios de enero (Eynard y Galetto, 2002; Silva *et al.*, 2004). La reproducción es en base a semillas y por raíces gemíferas, yemas emitidas desde las raíces las cuales generan una rebrotación acelerada (Echeverría y Giulietti, 2002; Codina *et al.*, 2003). La floración se produce en primavera cercano al mes de octubre con flores notorias de color amarillo vistoso (Codina *et al.*, 2003). El chañar es una especie endémica de América del sur y su distribución contempla países como Chile, Argentina, Bolivia, Perú, Paraguay y Uruguay (Eynard y Galetto, 2002).

En Argentina se localiza en el dominio chaqueño de la región neotropical, y ocupa cuatro de los distritos chaqueño oriental, ñandubay, del algarrobo y del caldén, que componen a la provincia chaqueña, presentando climas cálidos y húmedos con lluvias abundantes en primavera y en verano (Cabrera, 1971; Echeverría y Giulietti, 2002). En esta distribución destaca las características de especie xerófila, típica de lugares donde se producen inundaciones periódicas, resistente a la salinidad y con comportamiento freatófito cuando alcanza la napa freática (Codina *et al.*, 2003). Esta provincia se caracteriza por presentar llanuras y serranía de poca elevación, el clima es continental cálido con precipitaciones estivales que oscilan entre 500mm a 1200mm, temperaturas medias de 20 a 23°C, y el tipo bosque xerófilo caducifolio como vegetación predominante (Cabrera, 1971). Dalmaso (2010) la caracteriza para la región del piedemonte ocupando los valles y las depresiones donde las limitantes climáticas se restringen a la cantidad y calidad del recurso hídrico, las bajas temperaturas y la heterogeneidad de los suelos (Dalmaso, 2010). También la describe en la región de llanura, caracterizada por presentar suelos arenosos con drenaje excesivo, mínimas precipitaciones con una alta amplitud térmica donde la temperatura mínima puede llegar a los -14°C (Dalmaso, 2010; Dicek, 2011)

En Perú la distribución es reducida limitada a los oasis de la ecoregión del desierto costero peruano situadas en las zonas de baja altitud cercanas a la costa, estas lagunas costeras formadas por agua ligeramente salada sirven de fuente de nutrientes para el desarrollo de la vegetación que soporta la salinidad del ambiente, el clima es clasificado como subtropical muy árido de alta humedad atmosférica (Pérez y Balta, 2007), también se ha descrito en el valle de pisco (Whaley *et al.*, 2010).

En Chile se distribuye entre la XV Región de Arica y Parinacota hasta la IV Región de Coquimbo (García y Ormazábal, 2008). Se registran poblaciones en las provincias de Arica y Choapa ocupando llanuras arenosas, oasis y quebradas, desde el nivel del mar hasta los 2300 metros de altitud, llegando ocasionalmente a los 3000 metros, en laderas de exposición norte y de sureste a suroeste (Ortiz, 1948; Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005; García y Ormazábal, 2008). El chañar se caracteriza por poblar zonas áridas y semiáridas y habita de forma abundante en los valles del norte grande (e.g. valle de Lluta, Azapa, Chaca y Copiapó) formando chañarales, donde la temperatura media anual oscila entre los 15,6 a 19,8°C, la máxima del mes más cálido ronda los 23,8 a 30,4°C y la mínima

del mes más frío ronda los 7,6 a 10,6°C (Ortiz, 1948; Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005; García y Ormazábal, 2008; Román *et al.*, 2012). La precipitación media anual varía entre los 320 a 860mm y en ocasiones se registran precipitaciones por debajo de los 100mm anuales (Román *et al.*, 2012). Alvarado *et al.* (2012) coincide en su clasificación de especie de climas áridos que habita en condiciones de planicies secas y quebradas rocosas con buena condición de drenaje, soporta reducidas cantidades de agua, requiere de suelos sueltos y de alta luminosidad (Alvarado *et al.*, 2012). Ortiz (1948) la describe como una especie adaptada a suelos altamente salinos donde dominan los sulfatos y cloruros, terrenos en los cuales otras especies forestales no podrían desarrollarse. Aunque su crecimiento no se restringe únicamente a este tipo de suelos, Bravo *et al.* (2010) la ha caracterizado para suelos del orden entisols en la nomenclatura USDA y regosol eutric para la utilizada por FAO, este tipo de suelos se caracterizan por presentar desarrollo limitado provenientes de depósitos aluviales recientes o suelos muy delgados sobre roca, poseen escasa acumulación de materia orgánica y se presentan en dunas o en suelos con pendientes altas, característicos de climas áridos secos y áridos fríos (USDA, 2010).

El estado de conservación del chañar, en el país, se clasifica en estado de preocupación menor según la UICN¹. Destaca su importancia ecológica como fuente de alimento para especies como el picaflor de Arica, especie catalogada en peligro de extinción (BirdLife International, 2012; Groom, 2012). El Ministerio de Tierras y Colonización mediante el DS 366/44 reglamenta la explotación de chañar prohibiendo para la Región de Tarapacá su descepadura y permitiendo el corte en los meses de abril, mayo, junio y julio.

La madera del chañar presenta diversos usos como combustible (leña, carbón) y un menor uso en carpintería dado el reducido diámetro de los árboles (García y Ormazábal, 2008). Sus semillas también utilizada como fuente de alimento y en el ámbito de la etnofarmacología, su principal derivado es el “arope” consistente en un jarabe dulce obtenido mediante la deshidratación parcial de sus semillas utilizado para tratar enfermedades inflamatorias de las vías respiratorias (Silva *et al.*, 2004; Reynoso *et al.*, 2013).

Las semillas de chañar poseen un alto contenido de aceite alcanzando porcentajes medios del 47,2% a diferencia del fruto el cual solo alcanza el 6,3% (Lamarque *et al.*, 2000; Maestri *et al.*, 2001). El aceite de chañar se compone de ácido oleico (53,7%), ácido linoleico (30,7%), ácido palmítico (7,2%) y ácido esteárico (4,3%) (Lamarque *et al.*, 2000; Maestri *et al.*, 2001). El grado de instauración de 85,6% es equivalente al de muchos aceites vegetales comerciales (Lamarque *et al.*, 2000). Una característica inusual en el aceite de chañar es la relación de 1:3 de ácidos oleico-linoleico, por ausencia de ácido linolenico, (Lamarque *et al.*, 2000; Maestri *et al.*, 2002). La producción de frutos puede oscilar entre 6 a 8kg por año, después de haber completado el periodo de crecimiento de aproximadamente 10 años (Román *et al.*, 2012). Cada fruto posee entre 1 a 2 semillas, equivalentes entre 6 y 16kg de semillas por individuo al año (Román *et al.*, 2012). El aceite

¹ Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, organización internacional dedicada a la conservación de los recursos naturales. <http://www.iucn.org/es/>

de chañar es una materia prima adecuada para la producción de biodiesel, por sus niveles ácidos insaturados, que le imprimen una mejor lubricidad (Santibáñez, 2011).

ii. Madi

Madia sativa Molina es una hierba anual perene, perteneciente a la familia Asteraceae del genero *Madia* y se caracteriza por tener 11 especies, todas anuales y perennes con características aromáticas nativas de Norteamérica y Suramérica (Delfino y Gonzáles, 2005; San Martín *et al.*, 2011). También es conocido con el nombre común “Madi” o “Melosa”, su altura varía entre los 0,2m hasta los 2m (Celedón-Neghme *et al.*, 2007; San Martín *et al.*, 2011). Las hojas basales forman una roseta, mientras que las hojas superiores crecen opuestas a lo largo de las ramas con tallos rígidos y muy frondosos (Delfino y Gonzáles, 2005; Celedón-Neghme *et al.*, 2007). Tanto hojas como tallos se encuentran recubiertos por tricomas glandulares los cuales liberan una sustancia pegajosa de fuerte aroma (Celedón-Neghme *et al.*, 2007). El período vegetativo desde la siembra a la madurez es de 3 meses (Delfino y Gonzáles, 2005; San Martín *et al.*, 2011). La floración dura de 3 a 7 semanas generando inflorescencias dispuestas en forma de panícula de un color amarillo verdoso en el extremo del tallo, sésiles y redondas, protegidas por brácteas dispuestas en una sola fila (Celedón-Neghme *et al.*, 2007; San Martín *et al.*, 2011). El fruto es un aquenio pequeño ligeramente curvo de color gris claro, el cual madura en la estación seca, sus dimensiones varían de 2,5 a 7mm largo y de 2 a 2,5mm ancho (Schmeda-Hirschmann, 1995; San Martín *et al.*, 2011; Román *et al.*, 2012).

El contenido de aceite de cada semilla de Madi varía entre 26% y el 40% (Schmeda-Hirschmann, 1995; Román *et al.*, 2012). La composición del aceite de semilla de Madi es rico en ácidos grasos insaturados principalmente ácido oleico (7,9 a 10,2%) y linoleico (71,4 a 72,4%) (Román *et al.*, 2012; Schmeda-Hirschmann, 1995). La ausencia de ácido linolenico, lo clasifica como aceite semi-comestible (Schmeda-Hirschmann, 1995). Es una especie con rendimientos que varían entre 180 a 280kg de aceite por hectárea (Schmeda-Hirschmann, 1995), y entre 20 a 200 semillas por planta (Gonzáles *et al.*, 2008b). El factor limitante para el desarrollo de Madi es el recurso hídrico (Gonzáles *et al.*, 2008b).

Madi es originaria de América y se distribuye en la parte oeste de América de norte y del sur ocupando lugares como Alaska, California, Chile y Argentina (Delfino y Gonzáles, 2005). Se distingue una distribución anfítropical encontrándose en las zonas templadas de América del norte y del sur (Román *et al.*, 2012). En América del norte se le ha descrito en praderas costeras de alturas inferiores a los 950m por toda la costa del pacífico desde Alaska hasta el norte de la Baja California (NRCS, 2003).

En Chile madi se ha descrito como una planta recurrente de climas mediterráneos, desde los 33° hasta la 38° latitud sur, y ocupa los bosques de alta y mediana altitud llegando hasta los 2400msnm (Donoso, 1982; Román *et al.*, 2012). Se sitúa en pastizales abiertos o perturbados prefiriendo las laderas soleadas (González *et al.*, 2008b). El área de distribución presenta precipitaciones marcadas en invierno, que varían entre los 200 y 1000mm anuales con excepciones en las zonas cordilleranas donde la precipitación puede

alcanzar hasta los 2500mm anuales (Donoso, 1982). El verano también es marcado con periodos secos que varía de 8 meses en el norte hasta los 6 meses en el sur, las temperaturas máximas oscilan alrededor de los 30°C mientras que las medias se sitúan entre los 16 a 19°C y las temperaturas mínimas circundan los 3°C (Donoso, 1982; INE, 2006).

Madi es una especie que fue utilizada profusamente en la cultura Mapuche, y fue considerada la principal fuente de alimento y aceite en el siglo XVI (Wilhem de Mösbash, 1992). Con la llegada de los españoles se introdujeron especies como el trigo para el desarrollo de grano alimenticio sustituyendo a las especies nativas (Wilhem de Mösbash, 1992; San Martín *et al.*, 2011). Madi se encuentra desde la Región de Valparaíso hasta las provincias de Valdivia y Llanquihue inclusive en la isla de Chiloé, y ocupa los biótopos ruderales más cálidos y secos que el entorno (San Martín *et al.*, 2011). Es una especie resistente a sequías y a bajas temperaturas, tolerando hasta -20°C, crece en suelos pobres, erosionados y degradados, en todo tipo de textura con ph ácidos, neutros y alcalinos (5,5 a 8,5) (Schmeda-Hirschmann, 1995; San Martín *et al.*, 2011).

Zonificación de cultivos

La zonificación es la división del espacio en unidades territoriales según un criterio específico (Lasso, 1991; Suarez *et al.*, 2013), cuando se hace referencia a la zonificación de cultivos, donde la finalidad es ubicar los lugares más propicios para que las especies se desarrollen con altas producciones y bajos costos, la zonificación se realiza a partir de criterios como los usos del territorio y los requerimientos agroclimático específicos de los cultivos (Lasso, 1991; Suarez *et al.*, 2013). La utilización de metodologías para zonificar el territorio tiene el propósito de establecer una agricultura inteligente, eficiente en el uso de sus recursos, y su seguridad, así como la disminución de riesgos sociales y económicos asociados al establecimiento de la especie y su relación con el ambiente (Lasso, 1991; Suarez *et al.*, 2013).

Las metodologías de zonificación se utilizan para la división de áreas geográficas en zonas homogéneas, las relacionadas con los recursos naturales apuntan a la zonificación de áreas de cultivos, identificación de áreas de inundación, clasificación de zonas con peligro de deslizamientos, entre otras. Las metodologías para la zonificación de cultivos, se comenzaron a desarrollar en el “Marco para la Evaluación de Tierras” propuesto por FAO en 1976, planteando los aproximaciones conceptuales y la orientación metodológica que se debiese desarrollar para lograr los objetivos (FAO, 1997). Dos años después se concreta la metodológica en el Proyecto Zonas Agro-ecológicas aplicando la evaluación de tierras a una escala continental (FAO, 1997). Sin embargo, cada día se incorporan nuevos elementos que apuntan a un desarrollo sostenible, conservacionista con el ambiente y económicamente factible (Lasso, 1991; Suarez *et al.*, 2013). La zonificación agroecológica de cultivos ha sido aplicada por diversos autores: Lasso (1991) la ha utilizado para zonificar arroz y caña de azúcar en Colombia, Suárez *et al.* (2013) para la zonificación de cacao en Cuba y Aguilar-Rivera *et al.* (2010) para la zonificación de caña de azúcar en México. Los resultados obtenidos mediante estas zonificaciones permiten la visualización del área con

potencial de cultivos destacando los límites de la zona y cuantificando los terrenos (FAO, 1997).

La zonificación de cultivo es un método de aproximación, por lo que se puede abordar a escalas espaciales regionales o de mayor nivel con un factor de error que se incrementará al aumentar la precisión (FAO, 1997). Las metodologías de zonificación utilizadas en los últimos 10 años han incorporado en su aspecto tradicional el criterio experto, actualmente se ha incorporado también el aspecto económico dando origen a las denominadas zonificaciones ecológico-económicas en las cuales el objetivo primordial es la identificación de áreas donde ciertos usos específicos puedan ser introducidos mediante el desarrollo de programas que incorporen financiamientos (FAO, 1997). La incorporación de componentes socioeconómico a la zonificación, permiten establecer la espacialidad de la población, la ubicación de las industrias, su radio de influencias, de esta forma la zonificación se asimila más con la realidad (FAO, 1997).

MATERIALES Y METODOS

Área de Estudio

El estudio se desarrolló en Chile continental para la zona comprendida entre la Región de Arica y Parinacota ubicada en los 18° 28' latitud sur y 70° 18' longitud oeste, hasta la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena ubicada a los 53° 9' latitud sur y 70°55' longitud oeste (ver Figura 1).

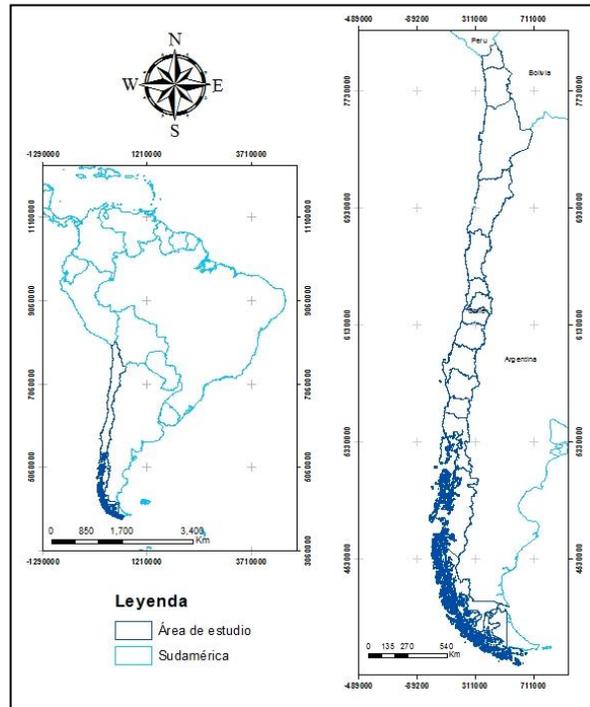


Figura 1: Área de estudio

La superficie total del área de estudio es de 756.096,3km² dividida en tres macrozonas, caracterizadas por el tipo de clima presente en cada una (Di Castri y Hajek, 1976; DMC, 2008).

La zona norte, desde Arica a La Serena, se caracteriza por presentar climas desérticos con precipitaciones casi nulas e irregulares donde la media anual se distribuye desde los 0mm a los 80mm, las temperaturas medias oscilan entre los 24,1 – 26,6°C la máxima y entre los 13,1 - 17,5°C la mínima (DMC, 2008). En las provincias de Tarapacá y de Antofagasta el clima desértico adopta la influencia oceánica, el altiplano en este sector posee clima pluviométrico tropical o de estepa con presencia de lluvias en verano fenómeno conocido como “invierno boliviano” (DMC, 2008). En la provincia de Atacama se genera una transición del clima desértico a mediterráneo superárido con un mayor nivel de precipitación y menor humedad relativa mientras que por sobre la cordillera de los andes se mantiene el clima estepárico frío (DMC, 2008). Luzio (1997) describe los suelos de esta

macrozona en el orden Entisols y Aridisols caracterizados como suelos pobres, muy delgados, con escasa acumulación de materia orgánica, déficit de humedad y alta concentración de sales, típicos de zonas desérticas.

La zona central, desde Valparaíso hasta Concepción, predomina un clima templado cálido o mediterráneo, la precipitación media anual se distribuye entre los 372,5mm hasta los 1110,1mm, las temperaturas bordean entre los 21,6 – 22,8°C la máxima en verano y entre los 10,5 - 13,6°C la mínima en invierno (DMC, 2008). Desde la provincia de Petorca hacia la provincia de Aconcagua se presenta un clima templado o mediterráneo continentalizado cambiando hacia un clima eumediterráneo (32° - 34° S) caracterizado por presentar una amplitud térmica, la que es mayor en la zona del valle, dada la baja humedad y con presencia frecuente de heladas invernales (Espinoza y Fuentes, 1991). La provincia de Valparaíso presenta un clima mediterráneo con baja amplitud térmica, producto de la influencia marítima (DMC, 2008). La provincia de Santiago presenta además del clima eumediterráneo, sectores segregados de climas más áridos, debido a la poca influencia oceánica, clima de estepa continentalizado (Espinoza y Fuentes, 1991). En la provincia de O'Higgins, Colchagua, Curicó, Maule, Linares, Ñuble y Concepción predomina el clima mediterráneo con un aumento en la precipitación, disminución de las temperaturas y una mayor amplitud térmica hacia el sur del país, bordeando los 10°C en las zonas cercanas a la costa (Espinoza y Fuentes, 1991; DMC, 2008). En la provincia de Talca se describe un clima más árido, que en sus provincias vecinas (Espinoza y Fuentes, 1991). Luzio (1997) caracteriza los suelos de esta macrozona en el tipo Mollisols con presencia de órdenes Alfisols, Inceptisols y Vertisols, suelos ricos en materia orgánica, profundos con buen drenaje y alta productividad agrícola.

La zona sur comprende desde Temuco hasta Cochrane, predominan climas templado lluvioso, templado frío, continental trasandino, de estepa fría y de hielo (DMC, 2008). La precipitación media anual se distribuye alcanzando los 2000mm en los sectores cercanos a Temuco y 3000mm en sectores cercanos a Cochrane y disminuye hacia el sur hasta los 555,6mm en la localidad de Puerto Williams debido a que el aporte cambia a nival (DMC, 2008). Las temperaturas bordean entre los 23,8°C - 19,7°C la máxima en verano y entre los 4,2°C - -1,7°C la mínima en invierno (DMC, 2008). El clima mediterráneo aún puede describirse en las provincias de Arauco, Biobío, Malleco, Cautín, Valdivia y Osorno, la presencia de la cordillera de la costa como formación consolidada impide la influencia oceánica generando zonas con períodos secos en verano (Espinoza y Fuentes, 1991). En las provincias de Llanquihue y Chiloé el clima mediterráneo ocupa sus últimas extensiones cambiando a un clima oceánico con humedades constantes y elevadas acompañadas de una baja amplitud térmica (Espinoza y Fuentes, 1991). Desde la provincia de Aysén hasta la Región de Magallanes y la Antártica Chilena predominan dos tipos de climas uno oceánico por la franja pacífica u occidental y un clima árido polar por la franja oriental o trasandina (Espinoza y Fuentes, 1991). Luzio (1997) caracteriza los suelos en esta macrozona en el orden Andisol derivados de ceniza volcánica, en menor proporción suelos del orden Utilisols y Alfisols caracterizados por presentar un horizonte B muy marcado con alta concentración de arcillas y suelos del orden Gelisols para los terrenos cubiertos por hielos.

Materiales

Los materiales utilizados para la realización de este estudio fueron los siguientes:

- Modelo digital de elevación (DEM) a una resolución espacial de 90m del área de estudio, obtenido del sensor SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) descargado de los servidores Global Land Cover Facility.
- Mapas temáticos para las variables bioclimáticas en formato digital a una escala de 1:250.000² (Uribe *et al.*, 2013).
 - Temperatura media máxima de enero
 - Temperatura media mínima de julio
 - Precipitación media anual
 - Evapotranspiración media de enero
 - Evapotranspiración media de julio
 - Radiación solar media de enero
 - Radiación solar media de julio
- Cartografía digital a una escala de 1:250.000 del límite nacional obtenidas de GISDATA Chile en formato vectorial.
- Mapas temáticos en formato vectorial a una escala de 1:250.000 obtenidas del Sistema Nacional de Información Ambiental.
 - Usos de suelo (CONAF, 1999).
 - Pisos vegetacionales (Luebert y Pliscoff, 2006)
 - Reservas naturales
 - Monumentos naturales
 - Parques nacionales
 - Áreas silvestres protegidas privadas (ASPP).
 - Sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad.
 - Sitios Ramsar.
- Cartografía en formato vectorial de los Grandes Grupos de Suelo de Chile a una escala 1:6.000.000 (Luzio y Alcayaga, 1990)
- Cartografía de los órdenes de suelo desarrollada por FAO (1995).
- Software ArcGIS v10 para el procesamiento de datos espaciales.

² Variables proporcionada por el Dr. Manuel Paneque, Bioquímico, Dr. en Bioquímica y Biología molecular y Académico en el Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.

Especies en Estudio

i. Chañar

Geoffroea decorticans [Gill. ex Hook. et Arn.] Burk especie leguminosa clase Magnoliopsida, orden Fabales, familia Fabaceae, subfamilia Faboideae, género *Geoffroea* (Silva *et al.*, 2004; García y Ormazábal, 2008).

El fuste posee un color verde, gris y amarillenta de relieve surcado por hendiduras que le otorgan una apariencia tortuosa ramificada, con corteza que se desprende sin dificultad, formando fajas (Silva *et al.*, 2004; García y Ormazábal, 2008). Las hojas son alternadas o fasciculadas, compuestas pinadas, con pecíolo y raquis glabros, compuestas de 3 a 9 folíolos subcoriáceos, sésiles o subsésiles, oblongos a elípticos oblongos de color verde oscuro (Silva *et al.*, 2004). Las flores se presentan como inflorescencias del tipo racimo, de color amarillento en sus pétalos con pigmentos anaranjados (Silva *et al.*, 2004; García y Ormazábal, 2008). El fruto es una legumbre drupácea, globosa, carnosa y muy dulce, en su estado maduro adopta una coloración café muy claro, su peso es de aproximadamente 5 gramos y de 1 gramo si se encuentra libre de cascara y pulpa interior (Silva *et al.*, 2004; Dicek, 2011).

Originaria de zonas áridas y semiáridas de Sudamérica, es endémica de países como Chile, Argentina, Bolivia, Perú, Paraguay y Uruguay (Eynard y Galetto, 2002; Vargas *et al.*, 2005; García y Ormazábal, 2008). Se presenta naturalmente en llanuras arenosas y en quebradas, en alturas de hasta los 2500m (Rodríguez *et al.*, 1983; García y Ormazábal, 2008; Román *et al.*, 2012). De crecimiento arbustivo desarrolla un fuste erguido si crece de manera aislada con altura máxima de 8 a 10m, sus ramas crecen de forma extendida formando una amplia copa (Ortiz, 1948; Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005; García y Ormazábal, 2008; Román *et al.*, 2012). El sistema radicular es de carácter invasivo extendiéndose mediante raíces gemíferas las cuales darán origen a nuevas plantas (Echeverría y Giulietti, 2002; Codina *et al.*, 2003). La floración comprende los meses de primavera desde septiembre a octubre y fructifica en verano de noviembre a enero (Eynard y Galetto, 2002; Silva *et al.*, 2004).

El fruto es comestible utilizado para preparar una bebida dulce denominada “arope de chañar” de uso común en las provincias Argentinas y en la Región de Atacama (Silva *et al.*, 2004; García y Ormazábal, 2008; Reynoso *et al.*, 2013). También es utilizada como planta ornamental por la belleza en sus flores en parques y zonas de conservación (Silva *et al.*, 2004; García y Ormazábal, 2008; Reynoso *et al.*, 2013). La corteza es utilizada como expectorante y anti-asmático en la medicina no tradicional para casos de catarro y tos, mientras la madera que posee una alta resistencia es empleada en carpintería y como leña (Silva *et al.*, 2004; García y Ormazábal, 2008; Reynoso *et al.*, 2013).

ii. Madi

Madia sativa Mol. hierba aromática, clase Magnoliopsida, orden Asterales, Familia Asteraceae, subfamilia Asteroideae, genero Madia (Delfino y Gonzáles, 2005; San Martín *et al.*, 2011).

Especie anual de hojas arrosietadas glandulosas opuestas a lo largo de las ramas con tallos rígidos y muy frondosos recubiertos por tricomas glandulares los cuales liberan una sustancia pegajosa de fuerte aroma (Delfino y Gonzáles, 2005; Celedón-Neghme *et al.*, 2007). La flor de color amarillo se presenta como inflorescencias dispuestas en forma de panícula, sésiles y redondas, protegidas por brácteas dispuestas en una sola fila (Celedón-Neghme *et al.*, 2007; San Martín *et al.*, 2011). El fruto es un aquenio pequeño ligeramente curvo de color gris claro de tamaño pequeño 2,5 a 7mm largo y de 2 a 2,5mm ancho (Schmeda-Hirschmann, 1995; San Martín *et al.*, 2011; Román *et al.*, 2012).

Originaria de Norteamérica y Sudamérica se distribuye en zonas de clima templado en países como Chile, Argentina y EE.UU (Delfino y Gonzáles, 2005; San Martín *et al.*, 2011). Se presenta en elevaciones de hasta los 2000m en el límite del bosque, en sectores con precipitaciones constantes y en sectores de secano donde el periodo seco puede alcanzar los 6 a 10 meses y la precipitaciones alcanzan los 100 – 300mm anuales concentrados en invierno. Se presenta en condiciones de luz expuesto a pleno sol y en condiciones de semi-sombra, en partes planas y laderas de exposición norte (Delfino y Gonzáles, 2005; San Martín *et al.*, 2011). Respecto al tipo de suelo se desarrolla en ph ácidos, neutros y alcalinos, en texturas arcillosas, francas y arenosas que posean la humedad necesaria, no tolera los encharcamientos por lo que el suelo debe estar bien drenado (Delfino y Gonzáles, 2005; San Martín *et al.*, 2011).

En crecimiento puede alcanzar alturas de entre los 0,2m hasta los 2m (Celedón-Neghme *et al.*, 2007; San Martín *et al.*, 2011). Es una especie de unidades reproductivas monoica que utiliza insectos para la polinización de sus flores (Delfino y Gonzáles, 2005; San Martín *et al.*, 2011).

La planta es considerada comestible y de uso medicinal para enfermedades como la gota, ciática, opilaciones y purgativa (Delfino y Gonzáles, 2005; San Martín *et al.*, 2011).

Método

Definición de variables agroecológicas y productivas de las especies Chañar y Madi.

La zonificación agroecológica y productiva se realizó utilizando el modelo de evaluación de tierras desarrollado por Rossiter (1996) y el modelo de producción desarrollado por Monteith (1996). El modelo de evaluación de tierras define criterios de evaluación, con los cuales zonificar la aptitud de la tierra, para un uso determinado de suelo, proponiendo la utilización de unidades territoriales que otorguen características del terreno mediante las cuales se identificó la mejor aptitud de la tierra para un uso específico (Rossiter, 1996; FAO, 1997). La identificación de la aptitud de tierra se realizó mediante un modelo de evaluación que combina los requerimientos de las especies con las variables espaciales que dan cuenta de los parámetros agroclimáticos, la combinación de las variables y sus requerimientos se denominan criterios de evaluación o reglas de decisión (Rossiter, 1996; FAO, 1997). Dependiendo de la especificidad del requerimiento en las variables agroclimáticas y el conocimiento de los requerimientos de las especies, la aptitud de tierra mantendrá un carácter binario (óptimo o marginal) o generará un gradiente de aptitud (óptimo, apto, marginal).

El modelo de producción desarrollado por Monteith (1996) establece como indicador aceptable de la producción de una especie, la cantidad de biomasa seca obtenida por unidad de superficie. El modelo fue desarrollado para condiciones de secano y de riego, integrando componentes como el paso de tiempo diario, el crecimiento de la planta, el balance fotosintético, hídrico y térmico mediante las cuales estima la producción en kilogramos de materia seca por hectárea (Monteith, 1996; ODEPA, 2010).

En base a la información agroclimática descrita se zonificaron agroecológica y productivamente las especies chañar y madi, se sintetiza la ruta y metodología utilizada en la Figura 2.

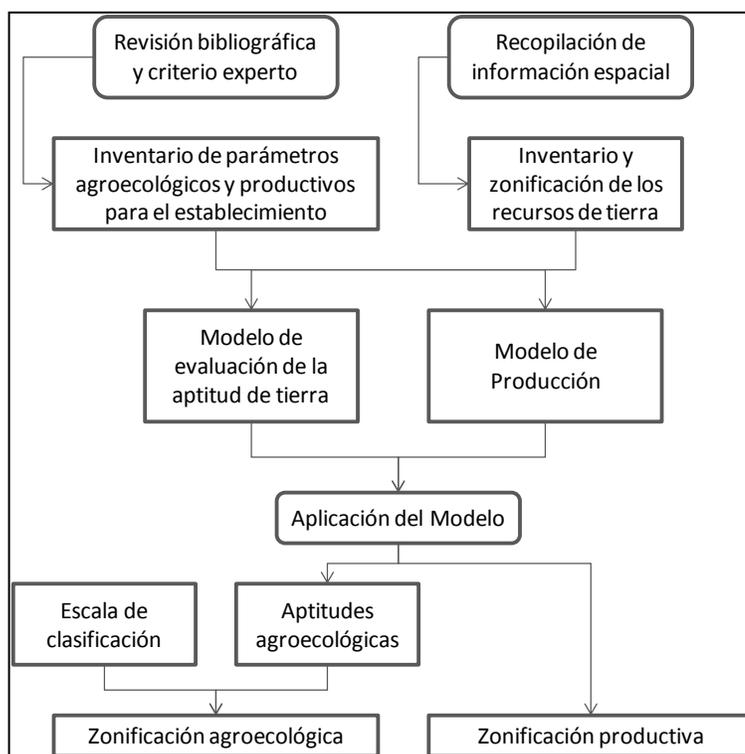


Figura 2: Esquema metodológico para la zonificación agroecológica y productiva

Inventario de parámetros agroecológicos y productivos.

Se consideraron variables térmicas, pluviométricas y edáficas para identificar el área potencial de establecimiento de las especies y se estableció el rango para cada parámetro que es determinante para la adaptabilidad de las especies. Se priorizaron los parámetros que hacen referencia a la distribución nacional de las especies, y se complementó la información con parámetros que hacen referencia a localizaciones en otros lugares³.

Las variables consideradas en las zonificación agroecológica fueron:

1. Temperatura media mínima de julio (Uribe *et al.*, 2013)
2. Temperatura media máxima de enero (Uribe *et al.*, 2013)
3. Precipitación media anual (Uribe *et al.*, 2013)
4. Ubicación de valles en el norte de Chile (Elaboración propia)
5. Pendiente (Elaboración propia)
6. Exposición (Elaboración propia)

³ Juan Manuel Uribe, 2013. [Entrevista personal]. Ingeniero Agrónomo experto en agro-climatología, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

7. Altitud (Elaboración propia)
8. Ordenes de suelo (FAO, 1995)
9. Grandes grupos de suelo (Luzio y Alcayaga, 1992)
10. Radiación solar enero (Uribe *et al.*, 2013)
11. Radiación solar julio (Uribe *et al.*, 2013)
12. Evapotranspiración media de enero (Uribe *et al.*, 2013)
13. Evapotranspiración media de julio (Uribe *et al.*, 2013)

Inventario de los recursos de tierra

Las variables de los recursos de tierra⁴ fueron digitalizadas y espacializadas, según correspondió y además estandarizadas para el sistema de referencia WGS84 UTM19s en formato ráster debido a la simpleza que otorga en este tipo de procedimientos espaciales, la resolución espacial de la información utilizada y generada correspondió a una escala 1:250.000 a excepción de las variables de suelo que poseen una escala 1:6.000.000 (Reuter, 2006).

- Los modelos digitales de terreno (MDT) derivados del DEM, se les aplicó un filtrado de paso bajo 3x3 con la finalidad de suavizar y corregir imperfecciones ocasionadas en su elaboración por parte de la toma de datos del sensor remoto SRTM.

- Los MDT de las variables morfológicas correspondientes a pendiente, exposición y altitud fueron generados utilizando algoritmos específicos de los sistemas de información geográfica (SIG) (Apéndice 2).

- Se utilizó la cartografía de órdenes de suelos de la FAO (1995), adaptada a la clasificación de órdenes utilizada por United States Department of Agriculture (USDA), mediante el documento “Base Referencial Mundial del Recurso Suelo” elaborado por la IUSS (2007) y se le incorporó la cartografía de los grandes grupos de suelo de Chile de Luzio y Alcayaga (1992) (Apéndice 3).

- La cartografía disponibilidad de usos de suelo consideró al territorio nacional excluyendo a los suelos agrícolas del catastro de vegetación de CONAF (1999), zonas establecidas en el sistema nacional de áreas silvestres protegidas (reservas naturales, monumentos naturales y parques nacionales) (MMA, 2011), zonas de protección ecológica de carácter científico (MMA, 2011), sitios declarados prioritarios para la conservación (MMA, 2011) y sitios RAMSAR (MMA, 2005). La clasificación específica del catastro de vegetación, excluye los usos de suelo del tipo urbano, bosque, humedales, nieves, cuerpos de agua y glaciares, y selecciona como zonas aprovechables los usos de suelos denominados pradera, matorrales, áreas sin vegetación y áreas no reconocidas (Apéndice 4).

⁴ La unidad de tierra corresponde a una unidad espacial de suelo que incluye características del clima, por ende el inventario de los recursos de tierras corresponde a una superposición de información espacial referente a clima y suelo (FAO, 1997).

- La cartografía de ubicación de los valles en el norte de Chile comprende una cobertura de los valles en las regiones XV, I, II y III, se elaboró utilizando la cartografía de pisos vegetacionales clasificados por Luebert y Pliscoff (2006), las categorías de pendientes desarrollada por Gastó *et al.* (1990) y la red de drenaje de las regiones elaboradas a partir del modelo digital de elevación (Apéndice 5). La región de valle caracterizada por presentar una condición de pendientes planas (Cosio *et al.*, 2007), para su identificación se seleccionaron las pendientes menores a 4,5% correspondientes a las zonas de depresión y pendiente de carácter plano suave en la clasificación de Gastó *et al.* (1990). A la red de drenaje se aplicó un buffer de 250m para incluir la zona de valle y alrededores cercanos donde el crecimiento vegetal es favorecido por la humedad que la condición de valle brinda⁵. La combinación de esta zona de valle preliminar y las pendientes de carácter plano suave generaron la cartografía de los valles en el norte de Chile, los pisos vegetacionales se utilizaron para excluir el área catalogada como desierto absoluto incluida en la anterior cartografía debido a su condición de pendiente plana.

Modelo de Evaluación de la Aptitud de Tierra

El modelo de evaluación de la aptitud de la tierra (EAT) se estableció en base a los requerimientos climáticos y edáficos de las especies a zonificar, y en base a información científica y criterio experto (FAO, 1997; Rossiter, 1996). Los criterios se diferenciaron en función de su comportamiento en la zonificación, donde a un criterio se le denominó **factor** si posibilita en alguna medida el establecimiento de la especie y se le denominó **limitante** si lo restringen (Rossiter, 1994; Rossiter, 1996; Eastman, 2003). Para los criterios establecidos como factores se generaron rangos de aptitud y se dividieron en áreas de mayor adaptabilidad para el cultivo, áreas de rangos medio y áreas de rangos bajos. Los criterios que responden a una lógica binaria donde las soluciones solo abarcan dos opciones (e.g. “sí” o “no”; “1” o “0”), se denominaron limitantes sin generar rangos de aptitud. Mediante operaciones de lógica booleana y álgebra de mapas se excluyeron las áreas correspondientes a criterios limitantes utilizando una reclasificación de píxeles donde el área se incorpora con valor “0” anulando el uso de ese territorio de manera algebraica y valor “1” para las áreas que no requieren ser anuladas (Rossiter, 1994; Rossiter, 1996; Eastman, 2003).

Se estableció la unidad mínima cartográfica (UMC), en base a la resolución espacial del DEM y los parámetros agroecológicos, utilizados en la zonificación de las especies, ya que comparten una resolución espacial de 90m equivalente a una escala 1:250.000 (Velásquez *et al.*, 2004; Rossiter y Vargas, 2004). Se estableció mediante un modelo validado por Velásquez *et al.* (2004), y Rossiter y Vargas (2004) que la UMC es de 2,25ha el modelo

⁵ Juan Manuel Uribe, 2013. [Entrevista personal]. Ingeniero Agrónomo experto en agro-climatología, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

relaciona el límite de la percepción visual y la escala de trabajo, por lo que áreas menores a 2,25ha se excluyeron de los análisis finales, porque no ser representativas para la escala de observación trabajada.

i. Reglas de decisión

Se generó una regla de decisión utilizando el inventario de parámetros de adaptación para cada especie, y se definieron categorías jerárquicas de aptitud para los parámetro hídrico, térmico y geológico utilizado para zonificar (Figura 3).

El esquema metodológico propuesto es una expresión generalizada de la elaboración de la aptitud agroecológica en base a criterios que forman aptitudes de tierra y criterios correspondientes a limitantes en el uso de terreno. El esquema incorpora los elementos elaborados en el nivel anterior como distintos niveles de restricción en los elementos de mayor nivel. Las restricciones de la aptitud térmica se derivan a la aptitud climática, de esta a la siguiente hasta alcanzar la aptitud agroecológica.

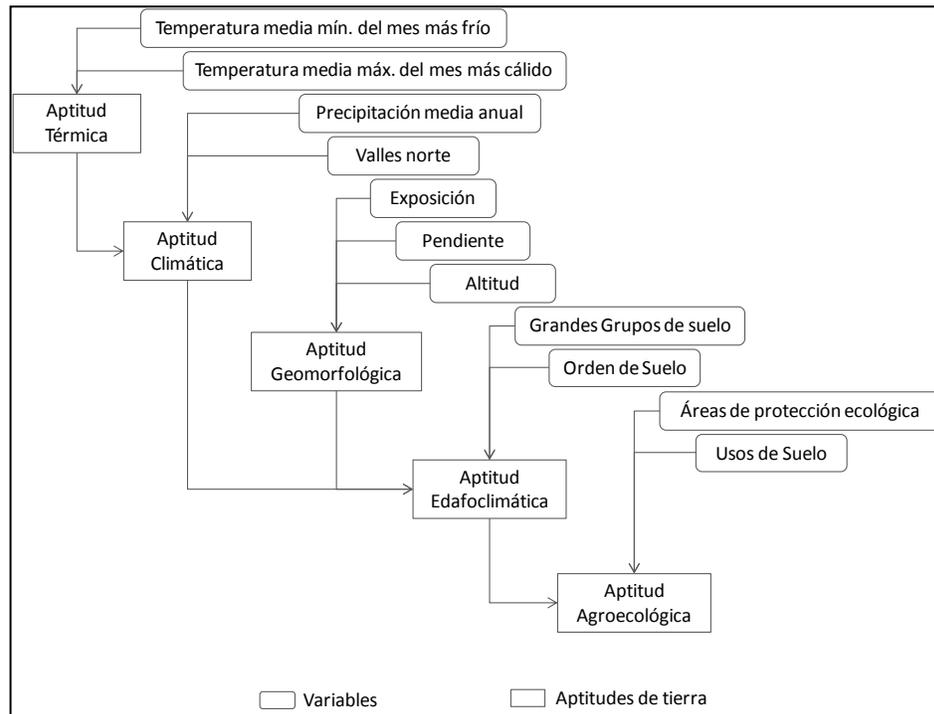


Figura 3: Esquema escalar para la elaboración de la aptitud agroecológica.

Para cada variable la clasificación utilizó diferentes unidades con la finalidad de conservar la autonomía luego del procedimiento GIS, como ejemplo para la variable precipitación media anual los rangos de adaptabilidad de la especie chañar se diferenciaron en cuatro categorías. La primera agrupo los rangos de mayor adaptabilidad, la segunda categoría reunió el rango de adaptabilidad medio en esa variable, la tercera categoría reflejó las condiciones de adaptabilidad bajas próximas al límite del rango adaptativo de la especie y la cuarta categoría expresó el rango en el cual el crecimiento de la especie no es posible.

Las categorías de adaptabilidad se clasificaron en unidades más simples 3, 2, 1 y 0 donde cada número significa el rango en esa variable, el rango de mayor adaptabilidad se clasificó en los valores altos y los de menor adaptabilidad en valores bajos excluyendo el cero, este último valor se reserva para los rangos de adaptación excluyentes en cualquier variable. Para un segundo factor la clasificación se eleva a una unidad de nivel mayor de manera de no perder la significancia en cada factor clasificado, de esta forma el segundo factor se clasificará 30, 20, 10 y el siguiente 300, 200, 100. Un área clasificada 331 es aquella que reúne los mejores rangos de adaptación para los factores de niveles mayores 300 y 30, y posee una restricción en la variable que representa la unidad de valor 1.

ii. Escala de clasificación

La escala de clasificación recoge el significado de cada combinación de aptitud de tierra y expresa en categorías de clasificación basadas en la potencialidad del establecimiento de las especies y en los factores restrictivos determinados por la sensibilidad de la especie en cada variable (FAO, 1997). Este sistema expondrá una representación cuantitativa del valor espacial desplegado en cada celda, al que se le asignará un significado cualitativo.

La aptitud de la tierra se clasificó en un sistema que refleja la potencialidad del establecimiento de la especie definiéndola como óptima, apta y marginal. La categoría óptima agrupa las mejores condiciones de adaptabilidad para que la especie o cultivo pueda desarrollarse sin inconvenientes, esta categoría agrupa las combinaciones entre unidades de orden 3 y permite combinaciones entre variables clasificadas en orden 3 y orden 2. La categoría apta considera las condiciones de adaptabilidad media agrupando combinaciones de variables clasificadas entre unidades de orden 2 y combinación de unidades entre variables de orden 3 y orden 1. La categoría marginal expresa condiciones que se encuentran en el límite de adaptabilidad de la especie y las agrupa mediante combinaciones de variables clasificadas en unidades de orden 1 y combinaciones de esta con el orden antecesor. La incorporación de nuevas variables conlleva a un aumento en el número de combinaciones que es posible registrar.

El sistema de clasificación de la aptitud de tierra se desarrollo siguiendo un criterio que asegure la lógica en la clasificación, al analizar los valores individuales generados en cada combinación de código. El criterio correspondió a la importancia que representa la variable clasificada en ese dígito, el código de orden 3 (3, 30, 300) correspondió en todas las variables al rango de mayor adaptabilidad de la especie en ese parámetro, el de orden 2 (2, 20, 200) correspondió en todas las variables al rango de adaptabilidad media de la especie en ese parámetro y el código de orden 1 (1, 10, 100) correspondió en todas las variables al rango de menor adaptabilidad de la especie en ese parámetro. El método de clasificación se sustenta en el “valor de clasificación” originado de la sumatoria entre la adición del valor de los dos números de mayor orden y la adición de los dos valores de menor orden y clasificarlo mediante le intervalo expuesto en el cuadro 3.

Cuadro 3: Intervalo de clasificación para los valores promedios

Intervalo	Aptitud
< 7	Marginal
$7 \leq x < 9$	Apto
≥ 9	Óptimo

Fuente: Elaboración propia

Este método a diferencia de aquellos que utilizan un valor promedio de las celdas para la clasificación, permite diferenciar celdas, como ejemplo, de códigos 113 y 221 cuyo el valor promedio es el mismo. Sin embargo, la segunda celda presenta dos variables de orden 2 indicando que es menos restrictiva que la primera celda la cual presenta dos variables de orden 1. La celda 221 posee un valor de clasificación de siete situándola en la categoría “apta” y la celda 113 posee un valor de clasificación de seis situándola en la categoría “marginal”. El cuadro 4 muestra el detalle de las combinaciones de códigos clasificados en los niveles de aptitud respectivos.

Cuadro 4: Combinaciones de códigos y su clasificación para cada categoría de aptitud

Aptitud	Código	
	Zonificación térmica / climática	Zonificación edafoclimática / agroecológica ⁶
Óptimo	33 - 32 - 23	333 - 332 - 323 - 233 - 322 - 232 - 223
Apto	31 - 22 - 13	321 - 313 - 312 - 331 - 231 - 222 - 213 - 133 - 132 - 123 - 122 - 212 - 221
Marginal	12 - 21 - 11	111 - 112 - 121 - 211 - 113 - 311 - 131

Fuente: Elaboración propia

La segunda categoría de clasificación representa la restricción térmica, hídrica y de relieve o geoforma que reduce la adaptabilidad de la especie, expresada en función de la variable restrictiva como una restricción leve y/o alta. La restricción se clasificaron en leves o bajas “(b)” para los códigos de orden 2, mientras que para códigos de orden 1 la restricción se denominó alta “(a)”. Se utilizaron la inicial de cada variable en la cual existiese un restricción para identificarla en el código, para restricciones térmicas corresponde una letra “T”, para restricciones hídricas correspondió la letra “H” y para restricciones de geoforma correspondió una letra “G”.

⁶ Las zonificaciones edafoclimáticas y agroecológicas se diferencian mediante la incorporación de la aptitud de disponibilidad de uso, esta última posee un carácter de factor limitante el cual no genera nuevas combinaciones de códigos permitiendo utilizar el mismo sistema de clasificación en ambas zonificaciones.

Modelo de Producción

Se utilizó el modelo de producción propuesto por Monteith (1996) y se modificó, sustituyendo las funciones térmicas e hídricas, consistentes en balances de energía independientes, por cocientes de temperatura y evapotranspiración. La función térmica es un índice térmico cuyo valor oscila entre 0 y 1, donde el valor de temperatura óptima para la especie adquiere el valor 1 y se aleja acercándose a cero para temperaturas menos aptas (Monteith, 1996; ODEPA, 2010). La función térmica (FT) adaptada consistió en un cociente entre la temperatura media del área de estudio y la temperatura media óptima registrada mediante la primera etapa metodológica, este procedimiento se trató en un GIS generando de forma espacial una cobertura de la función térmica (Ecuación 1).

$$FT = \frac{[T(\text{opt}) - T(\text{area})]}{T(\text{area})}$$

Ecuación 1: Función térmica

Donde;

FT: Cociente de la función térmica

T(ópt.): Temperatura media máxima de enero óptima (°C)

T(área): Temperatura media máxima de enero del área de estudio (°C)

La función hídrica (FH) adaptada consistió, al igual que la función térmica, en un cociente desarrollado con valores de evapotranspiración (ETP) óptimos para el desarrollo de las especies y la ETP del área de estudio. Para determinar los rangos óptimos de ETP se recurrió a los registros de poblaciones naturales de las especies en el país, extrayendo los valores de ETP desde las localidades donde se registra la especie, este valor fue promediado y comparado con los valores de ETP óptima reportados en la descripción de las especies. Los valores de ETP determinados en las poblaciones naturales de Chile, se establecieron como los rangos óptimos a utilizar en la función hídrica calculada para la zonificación. La función hídrica utilizada en el modelo de producción se estableció mediante el cociente de los rangos óptimos de ETP calculados y la ETP del área de estudio (Ecuación 2).

$$FH = \frac{[ETP(\text{opt}) - ETP(\text{area})]}{ETP(\text{area})}$$

Ecuación 2: Función hídrica

Donde;

FH: Cociente de la función hídrica

ETP(ópt.): Evapotranspiración óptima (pp)

ETP(área): Evapotranspiración del área de estudio (pp)

El cociente de la función térmica se ajustó al rango determinado del modelo, entre 0 y 1. Cuando el rango especificado como óptimo, corresponde a una posición intermedia dentro de la distribución de la variable en el área de estudio generando valores superiores a 1, se entiende como una disminución de la producción por un efecto de golpe térmico o de calor excesivo. Esta condición de calor excesivo ejercerá un efecto negativo sobre las especies, y fue corregida del rango óptimo cuando la diferencia entre la temperatura óptima y la del área de estudio, genere un cociente mayor al 15%, de lo contrario al ser menor o igual se considera parte del rango óptimo⁷.

El modelo de producción de secano (Ecuación 3) utiliza valores de radiación solar (E), de eficiencia de uso de la radiación solar (EURS) e intercepto del cultivo (I), coeficientes de carácter específico en cada especie (ODEPA, 2010). Se consideraron valores estándar para los coeficientes de eficiencia de usos de la radiación solar ($16,72 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ ms}^{-1}$) y para el intercepto de la luz por el cultivo (15%) en ambas especies.

$$PCS = E \cdot EURS \cdot I \cdot FT \cdot FH$$

Ecuación 3: Modelo de producción de secano

Donde;

PCS: Producción potencial de biomasa en condiciones de secano ($\text{kg ms ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

E: Radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

EURS: Eficiencia de uso de la radiación solar ($\text{kg ms ha}^{-1} // \text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

I: Intercepción de la luz por el cultivo

FT: Función de control térmico. Esta función toma valores entre 0 y 1 en función del grado de proximidad de la temperatura al valor óptimo definido para la especie.

FH: Función de control hídrico. En este caso FH toma valores desde 0 a 1, en función del balance hídrico del cultivo.

⁷ Juan Manuel Uribe, 2013. [Entrevista personal]. Ingeniero Agrónomo experto en agro-climatología, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Zonificación mediante variables agroecológica del área de estudio para determinar la superficie potencial de establecimiento de las especies Chañar y Madi.

Descripción de los rangos agroecológicos para el establecimiento de las especies **Chañar y Madi**. El inventario de los parámetros agroecológicos y productivos para la especie chañar y madi se muestra en el Apéndice 1.

i. Chañar

Descripción de la adaptabilidad térmica

La especie chañar se encuentra adaptada a climas áridos y desérticos con temperaturas máximas de hasta 43°C, se describe su preferencia climática para temperaturas medias máximas de 19,8°C hasta los 30°C en los meses de verano (Ortiz, 1948; Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005; García y Ormazábal, 2008; Román *et al.*, 2012). La especie no se ve afectada por bajas temperaturas que denoten un período de helada, más aún, posee la capacidad de soportar temperaturas mínimas de hasta -15°C desarrollándose de forma normal con temperaturas mayores a 15°C en los meses de invierno (Ortiz, 1948; Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005; García y Ormazábal, 2008; Román *et al.*, 2012).

Descripción de la adaptabilidad hídrica

Prospera en zonas de precipitación media anual desde los 100mm en adelante, siendo registrada para localidades donde la variable alcanza valores de 500, 800 y 900mm (Román *et al.*, 2012). Se tienen registros de poblaciones establecidas en los valles de Lluta, Azapa (Región de Arica y Parinacota), valle de Copiapó (Región de Coquimbo) y en una localidad cercana a San Pedro de Atacama (Región de Antofagasta), valles establecidos con una precipitación media anual de 0mm donde la especie es capaz de satisfacer su demanda hídrica mediante aguas subterráneas (Alvarado *et al.*, 2012).

Descripción de la adaptabilidad en el relieve

Se ha descrito en elevaciones de 0, 200, 500, 1500, 2000 hasta los 3000msnm sin preferir un rango altitudinal específico pero con una mayor cantidad de descripciones en sectores de altitud media a baja de acuerdo a la elevación alcanzable en la zona norte del país (hábitat natural) (Ortiz, 1948; Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005; García y Ormazábal, 2008). Se desarrolla en zonas de quebradas, piedmontes y valles en todo tipo de pendiente, destacando su preferencia hacia sectores con algún tipo de inclinación principalmente por ser intolerante a sectores inundables con preferencia para orientaciones de exposición norte, sureste y suroeste (Ortiz, 1948; Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005; García y Ormazábal, 2008).

Descripción de la adaptabilidad edáfica

Es una especie adaptable a todo tipo de texturas de suelos desde arenosa a arcillosa prefiriendo texturas gruesas que provean un buen drenaje (Bravo *et al.*, 2010). Preferencia por suelos del tipo regosol eutric en la nomenclatura utilizada por FAO, correspondientes al tipo entisols en el sistema USDA, este orden se caracteriza por presentar bajos contenidos de materia orgánica, horizontes discontinuos y presencia de procesos erosivos (Bravo *et al.*, 2010). También se registra preferencia por suelos del orden ardisols, caracterizados por presentar altas concentraciones de sales y poseer texturas gruesas expresando un drenaje excesivo con muy baja retención de humedad (Bravo *et al.*, 2010).

ii. Madi

Descripción de la adaptabilidad térmica

La especie madi es una herbácea adaptada a climas mediterráneos de altura, prefiriendo temperaturas medias anuales de hasta 24°C para su desarrollo (INE, 2006; González *et al.*, 2008b). La falta de registros sobre el desarrollo óptimo en esta variable determinó la utilización del criterio del experto⁸ para generar los rangos de adaptabilidad. La información recopilada sobre esta especie confirma su capacidad de resistir heladas teniendo registros que validan su tolerancia a temperaturas medias mínimas de hasta -20°C prefiriendo temperaturas que oscilen de 9,5°C hasta los 16°C para su desarrollo normal (Schmeda-Hirschmann, 1995; INE, 2006; González *et al.*, 2008b; San Martín *et al.*, 2011).

Descripción de la adaptabilidad hídrica

En cuanto a precipitación ha sido registrada desde la Región de Atacama con 50mm al año hasta la Región de Magallanes con 3000mm anuales, incluyendo el Archipiélago de Juan Fernández (Donoso, 1982; INE, 2006). Se desarrolla en áreas con precipitación constante con periodos secos cortos de un mes, en sectores de secano puede desarrollarse en periodos sin precipitación de 3 a 5 meses y de 6 a 10 meses con precipitaciones que alcanzan los 400–800mm y 100-300mm respectivamente concentradas en invierno (Donoso, 1982; INE, 2006). Se describe de forma específica para la reserva nacional río clarillo, parque nacional la campana, farellones y en el tipo forestal bosque siempre verde, localidades en las cuales la precipitación media anual es de 550mm, 558mm, 700mm y 3500mm respectivamente (Donoso, 1982).

⁸ Juan Manuel Uribe, 2013. [Entrevista personal]. Ingeniero Agrónomo experto en agro-climatología, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Descripción de la adaptabilidad en el relieve

Se ha descrito en sectores de 0, 5, 20, 100 hasta los 2400msnm sin una preferencia marcada por un rango altitudinal o por algún grado de inclinación específica en el terreno, se denota su crecimiento en sectores expuesto a sol directo sin protección y bajo sombra por vegetación poco espesa, con una reducción de individuos en las poblaciones que poseen una orientación norte (Román *et al.*, 2012; Donoso, 1982).

Descripción de la adaptabilidad edáfica

No se detallan registros de la preferencia edáfica en la especie madi y solo se conoce su hábitat general, abarcando desde la Región de Valparaíso hasta la isla de Chiloé en la Región de Los Lagos (San Martín *et al.*, 2011). Los tipos de suelo entre estas regiones comprenden extensiones en los órdenes de suelo Entisol, Alfisol, Molisol, Andisol, Ultisol e Inceptisol.

Reglas de decisión

i. Chañar

La regla de decisión muestra los intervalos con los cuales zonificar las variables agroecológicas, establecidos con la información recopilada en la etapa anterior. El detalle se muestra a continuación en el cuadro 5.

Cuadro 5: Regla de decisión para la especie Chañar

	Óptima	Apta	Marginal	Excluyente	Referencias
Tmáx enero [°C]	25 - 30	25 - 20	<20 >30		Ortiz, 1948; Rodríguez <i>et al.</i> , 1983; Vargas <i>et al.</i> , 2005
Tmín julio [°C]	>0	0 - -3	<-3		Ortiz, 1948; Rodríguez <i>et al.</i> , 1983; Vargas <i>et al.</i> , 2005
Pp anual [mm]	>100	100 - 50	<50		Román <i>et al.</i> , 2012; Alvarado <i>et al.</i> , 2012
Alt [m]	<2300	2300 - 2875	2875 - 3000	>3000	Vargas <i>et al.</i> , 2005; García y Ormazábal, 2008
Pend [°]	0 - 20	20 - 40	>40		Vargas <i>et al.</i> , 2005; García y Ormazábal, 2008
Exp [°]	337,5 - 22,5 112,5 - 157,5 202,5 - 247,5			22,5 - 112,5 157,5 - 202,5 247,5 - 337,5	Vargas <i>et al.</i> , 2005; García y Ormazábal, 2008

Fuente: Elaboración propia

Se estableció como terrenos de óptimo crecimiento los lugares donde las temperaturas máximas en el mes de enero alcancen los 25 a 30°C, mientras que en invierno se estableció

temperaturas mínimas por sobre los 0°C, con precipitaciones por sobre los 100mm anuales considerando que posee la capacidad de resistir sequías, altitudes menores a 2300msnm, pendientes menores a 20°, exposición norte, sureste y suroeste, gran grupo de suelo torrithents, camborthids, salorthids, cryorthents, cryofibrists, cryaquepts, paleorthids, xerollic y paleargids, orden de suelo aridisols y entisols.

Los terrenos de crecimiento aptos, el desarrollo de la especie es posible pero no es el de máximo rendimiento del cultivo, Se establecieron para temperaturas máximas de verano entre 25 a 20°C y entre -3°C hasta los 0°C para temperaturas mínimas de invierno por su capacidad de resistir heladas, precipitaciones entre 50 a 100mm anuales, altitudes de 2300 a 2875msnm, pendientes entre 20 a 40°.

Los terrenos de crecimiento marginal contemplan las zonas que requerirán un manejo dependiente de riego, se establecieron para temperaturas máximas de verano sobre los 30°C, debido a la existencia de daños producidos por la alta radiación y por debajo de los 20°C, debido a que una ausencia de calor en estos meses disminuye la probabilidad de que la especie evolucione en su estado fenológico (Sepúlveda y Yuri, 2010; Martín *et al.*, sa). Las temperaturas mínimas de invierno se establecieron por debajo de los -3°C hasta los -15°C que es el mínimo valor de temperatura registrado, precipitaciones menores a 50mm anuales, altitudes entre los 2875 a 3000msnm, pendientes mayores a 40°.

ii. Madi

La regla de decisión muestra los intervalos con los cuales zonificar las variables agroecológicas, establecidos con la información recopilada en la etapa anterior. El detalle se muestra a continuación en el cuadro 6.

Cuadro 6: Regla de decisión para la especie Madi

	Óptima	Apta	Marginal	Excluyente	Referencias
Tmáx Enero [°C]	<28	28 - 30	>30		Uribe, 2013 ⁹
Pp anual [mm]	>620	620 - 150	<150		Donoso, 1982; INE, 2006
Alt [m]	400 - 2500	2500 - 3000 200 - 400	>3000 0 - 200		Román <i>et al.</i> , 2012; Donoso, 1982
Pend [°]	0 - 30	30 - 40	>40		Román <i>et al.</i> , 2012; Donoso, 1982
Exp [°]	22,5 - 337,5			337,5 - 22,5	Román <i>et al.</i> , 2012; Donoso, 1982

Fuente: Elaboración propia

⁹ Juan Manuel Uribe, 2013. [Entrevista personal]. Ingeniero Agrónomo experto en agro-climatología, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Se estableció como terrenos de óptimo de crecimiento los lugares donde las temperaturas máximas de verano, alcanzan hasta los 28°C, precipitación por sobre los 620mm anuales, altitudes entre los 400 a 2500msnm, pendientes menores a 30°, todo tipo de exposición excluyendo el norte, gran grupo de suelo cryorthents – camborthids, cryochrepts, haplustalfs – ustochrepts, pelloxererts – chromoxererts, haploxerolls - xerochrepts – calcixerolls, haploxerolls - xerochrepts – palexeralfs, hapludans, palexeralfs – haploxeralfs, paleudalfs, paleudalfs – hapludalfs, hapludands – palehumults, haplohumults – haplaquepts, haplohumults, udivitrands – hapludands y psamments – xerochrepts.

Los terrenos de crecimiento aptos se establecieron para las temperaturas máximas de verano entre los 28 a 30°C, precipitación entre 150 a 620mm anuales, altitudes entre los 200 a 400msnm y 2500 a 3000msnm, pendientes entre los 30 a 40°.

Los terrenos de crecimiento marginal se establecieron para temperaturas máximas de verano por sobre los 30°C debido a los daños presentes en los cultivos anuales producto de temperaturas muy elevadas (Sepúlveda y Yuri, 2010; Martín *et al.*, sa). Las precipitaciones por debajo de los 150mm anuales, altitudes entre los 0 a 200msnm y mayores a 3000msnm con pendientes mayores a 40°.

Los órdenes de suelo entisols y aridisols se utilizaron como un complemento de la variable grande grupos de suelo, integrando a la zonificación las coberturas de los suelos propensos a erosión en las aptitudes edáficas correspondientes. Su utilización en el modelo y por ende en la clasificación no corresponde al sentido tradicional de un factor limitante debido a que no anula el uso del territorio en los órdenes no clasificados como óptimos.

Zonificación de Aptitud

El modelo de evaluación EAT aplicado a las variables agroclimáticas mediante la regla de decisión estableció mapas para coberturas térmicas, climáticas, geomorfológicas, edafoclimáticas y agroecológicas.

Para la aptitud térmica se incorpora en la representación espacial áreas donde es factible que la especie presente restricciones de establecimiento por temperaturas muy bajas o muy altas las que conllevan en una alteración del desarrollo de la especie, en especial en los estados de germinación y floración por daños en yemas y botones florales (Shichi y Uritani, 1956; INTA, 2009). La alteración del metabolismo en las plantas hace referencia a los tipos de mecanismos específicos utilizado por especies vegetales para sobreponerse a temperaturas adversas y también hace referencia al daño producido en sus tejidos cuando no es posible sobreponerse a ella, en ambos casos el termino se relaciona con la energía destinada por la especie vegetal para llevar a cabo este proceso (Shichi y Uritani, 1956; INTA, 2009).

i. Chañar

a. Zonificación de la aptitud térmica

La zonificación de aptitud térmica de la especie chañar (Figura 4), muestra que la zona de aptitud óptima de crecimiento abarca el 43,4% del territorio nacional, equivalente a 32.833.757 hectáreas. La zona norte y central representan el 77,3% de la zona de aptitud óptima, lo que está relacionado con su distribución natural (Ortiz, 1948, Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005 y García y Ormazábal, 2008).

El 25,8% del territorio nacional se clasificó con aptitud de tierra apto, equivalente a 19.508.941 hectáreas. Esta superficie considera áreas con temperatura media mínima para el mes de julio que oscile entre los 0 y -3°C (Yoshida, 1984), y áreas con temperaturas media máximas para el mes de enero que varían entre los 20 a 25°C y otras con temperaturas mayores a 30°C siendo estas las de menor superficie (Ortiz, 1948, Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005 y García y Ormazábal, 2008).

La zona con aptitud marginal abarca el 30,8% del territorio nacional, equivalente a 23.257.477 hectáreas, con temperatura media mínima por debajo de los -3°C en el mes de julio y temperatura media máxima en el mes de enero por debajo de los 20°C (Ortiz, 1948, Rodríguez *et al.*, 1983; Vargas *et al.*, 2005 y García y Ormazábal, 2008).

El 63,2% de la superficie de la zona sur corresponde a terrenos con aptitud de tierra apta y marginal, sectores correspondientes a campos de hielo, los cuales no se ven excluidos desde el análisis específico de esta variable. También considera en una menor proporción las zonas de cordillera y altiplano en las macrozonas norte y central. La amplia distribución potencial de la especie en el contexto térmico de Chile, en relación a su distribución nativa, muestra una especie donde variable temperatura no representa una limitante en su distribución.

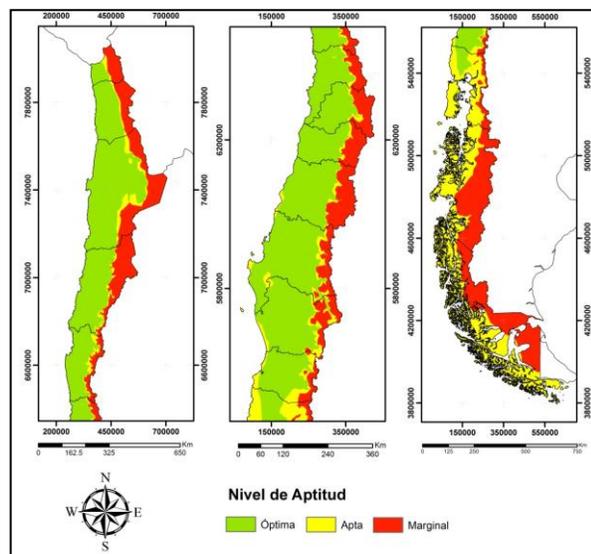


Figura 4: Aptitud térmica chañar.

b. Zonificación de la aptitud climática

La zonificación de la aptitud climática, considera la aptitud térmica y la variable hídrica de precipitación. El mapa de aptitud climática del chañar (Figura 5) incorporó la variable de corrección hídrica “ubicación de valles en la zona norte” y la variable base de precipitación media anual de acuerdo al comportamiento de la especie. El chañar es una especie que se distribuye preferentemente en zonas de climas áridos y semiáridos, donde el crecimiento y desarrollo se debe a su comportamiento freatófito, suple el déficit de precipitación por medio de la napa freática (Vargas *et al.*, 2005; García y Ormazábal, 2008; Román *et al.*, 2012). Se realizó una representación espacial de los sectores identificados como valles en el norte de Chile. Esta corrección permite elevar el nivel de aptitud a las zonas que cubran estas áreas, las cuales sin corrección se clasificarían como terrenos marginales basándose solo en la variable de precipitación media anual, lo que no permitiría identificar áreas relacionadas con el hábitat natural de la especie.

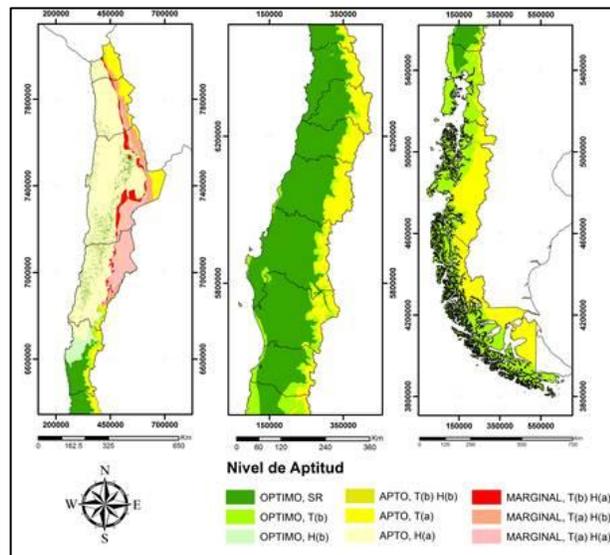


Figura 5: Aptitud climática chañar.

La zonificación climática muestra que una superficie con aptitud óptima de 34.231.014 hectáreas, correspondiente al 45,3% de la superficie nacional, concentrada mayoritariamente en la zona central del país, seguida por la zona sur, en disyuntiva a la distribución natural que la especie registra. La superficie en la aptitud térmica catalogada óptima abarcó el 43% de la superficie incrementándose en un 2,3% aproximado en la aptitud climática por concepto del incremento en las combinaciones al incorporar otra variable en esta última aptitud, ejemplificando, la superficie apta en la anterior aptitud térmica se incorpora en la nueva aptitud climática dentro de la categoría óptima con la salvedad en la restricción T(b). Por lo cual, las aptitudes no son comparables al momento de influir otras variables en la zonificación del territorio.

La superficie con aptitud climática apta comprende 35.254.730 hectáreas, 46,7% de la superficie nacional con una tendencia en la distribución a la zona central y sur. La zona

norte abarca las aptitudes marginales en sectores del altiplano con 6.051.460 hectáreas, 8% de la superficie nacional. Cabe considerar que la formación caracterizada como desierto por Luebert y Pliscoff (2006) se catalogó como una zona de adaptabilidad apta con una alta restricción hídrica, donde los sectores de valle se muestran como sectores óptimos para el desarrollo de la especie condiciéndose con la distribución natural de la especie.

c. Zonificación de la aptitud geomorfológica

La zonificación de la aptitud geomorfológica de chañar, muestra una amplia distribución en el territorio nacional, y se destaca la variable altitud por sobre la exposición y pendiente (Figura 6). La influencia de la variable se aprecia al restringir el territorio para la región cordillerana en la zona norte del país (Figura 6a). El potencial adaptativo del chañar se expresa como una distribución homogénea en las diferentes aptitudes optima, apta y marginal, se observa en la zona macroclimática norte, centro y sur la distribución influenciada por el ascenso en la altitud donde la aptitud de los terrenos se manifiesta de manera creciente a medida que la altitud disminuye.

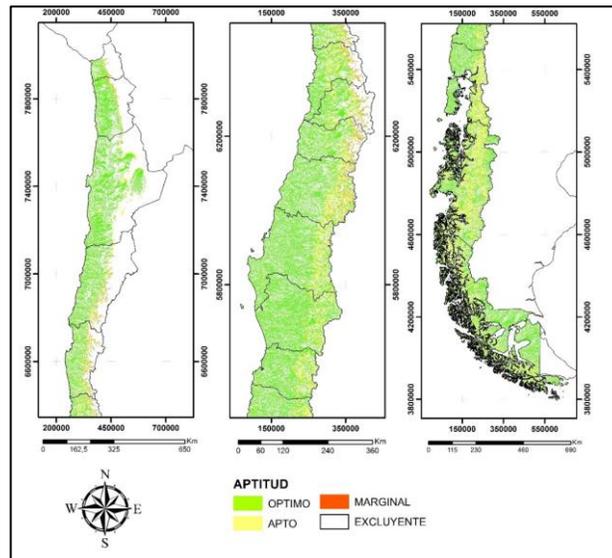


Figura 6: Aptitud geomorfológica chañar.

La zonificación de la aptitud geomorfológica del chañar excluyó por variables de altitud, pendientes y exposición 45.270.291 hectáreas, correspondientes al 59,9% de la superficie nacional, la que corresponde principalmente al altiplano de la zona norte por sobre los 3000 metros de altitud (Figura 6a). La superficie con aptitud óptimo para el chañar abarcó el 31,8% del total de la superficie nacional y el 79% de la superficie con potencial adaptativo. La categoría de aptitud apta y marginal abarcó superficies menores al 10% de la superficie total y menor al 20% de la superficie con potencial adaptativo en esta aptitud.



Figura 6a: Aptitud geomorfológica chañar de la zona norte.

d. Zonificación de la aptitud edafoclimática

La zonificación de la aptitud edafoclimática del chañar abarca una superficie de 8.521.935 hectáreas equivalentes al 11,3% de la superficie del territorio nacional. La superficie de aptitud edafoclimática se concentra en la zona norte y en el extremo superior de la zona central, Región de Valparaíso (Figura 7). La distribución de la aptitud edafoclimática coincide con la registrada por García y Ormazábal (2008) descrita para la zona norte desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Coquimbo excluyendo los sectores de alta cordillera. La categoría óptima de aptitud edafoclimática presenta los suelos distribuidos en la zona central y el extremo sur de la zona norte comprendiendo las regiones de Coquimbo y Valparaíso, además de sectores de valles en las primeras cuatro regiones del país. La superficie que abarcada por la aptitud óptima edafoclimática corresponden a 1.409.963 hectáreas, el 16,5% de la superficie con presencia de aptitud adaptativa. La categoría de aptitud apta edafoclimática abarca el 80,7% de la superficie con potencial adaptativo en 6.877.238 hectáreas distribuidas en las zonas norte coincidentes con la superficie con mayor déficit hídrico del país. La categoría de aptitud marginal edafoclimática abarcó el 2,7% de la superficie con potencial adaptativo con 234.733 hectáreas.

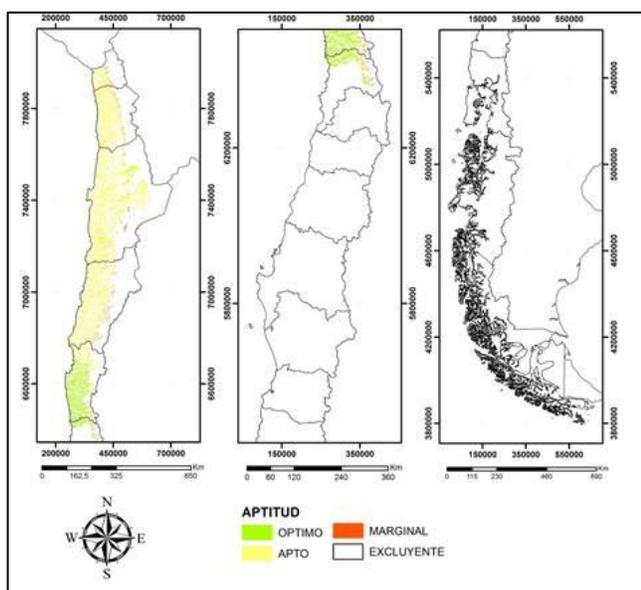


Figura 7: Aptitud edafoclimática chañar.

Las variables de suelo (grupos y ordenes de suelo), que modifican la aptitud climática y geomorfológica reducen la distribución de la especie drásticamente de todo Chile hacia la zona norte condicionando el crecimiento de la especie chañar. La distribución es coincidente con las registradas por Ortiz (1948), Rodríguez *et al.* (1983) y Vargas *et al.* (2005), quienes manifiestan esta preferencia de la especie chañar por suelos de texturas gruesas que permiten el drenaje del agua.

ii. Madi

a. Zonificación de aptitud térmica

La zonificación de la aptitud térmica indica que el 96,9% de la superficie del territorio nacional es óptimo para la adaptación de Madi. La superficie óptima concuerdan con la distribución nativa registrada por Donoso (1982) situándola desde la III Región de Atacama en la zona norte hasta la Región de Aysén en la zona sur. Dado la reducida restricción de territorio en la zonificación de aptitud térmica se deduce que la variable térmica, no es un factor restrictivo en la distribución de la especie. El 3% de la superficie corresponde a una aptitud apta de adaptabilidad con tendencia a preferir los terrenos de temperaturas más elevadas que el límite óptimo de la planta (<28°C) en 1 a 2 °C. El 0,1% del territorio nacional se clasificó con aptitud marginal, vale decir, territorios donde la temperatura media máxima del mes de enero se encuentra por sobre los 30°C condiciones en que la especie madi no logra su desarrollo óptimo. La distribución de aptitud marginal de madi abarca las macrozonas norte y centro del país comprendiendo las zonas de interior.

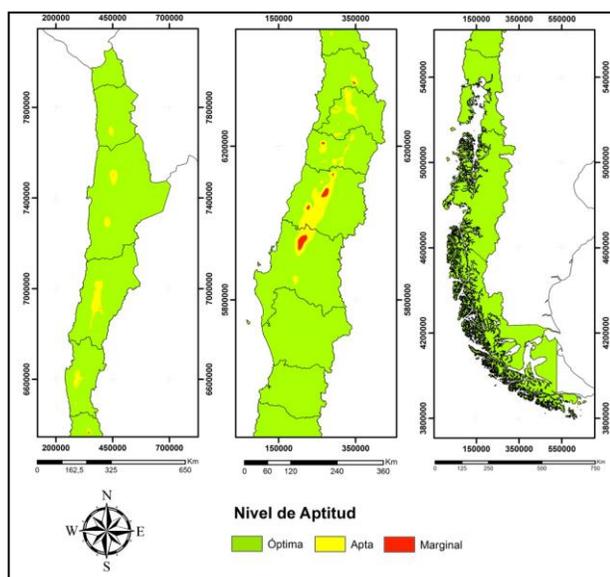


Figura 8: Aptitud térmica madi.

b. Zonificación de aptitud climática

La zonificación de la aptitud climática de madi, abarcó una superficie con aptitud óptima para la adaptación de madi estimada en 47.446.131 hectáreas equivalentes al 62,8% de la superficie del territorio nacional. El 76,4% de la superficie con aptitud optima de madi se presenta sin restricción comprendida en la zona centro y sur del país (figura 9). La aptitud climática apta y marginal se presentan en las zonas norte y centro del país, destacando los sectores de aptitud apta que presentan altas restricciones hídricas ubicadas en el piso vegetacional de matorral desértico y matorral bajo desértico (Lubert y Pliscoff, 2006) incluido el altiplano en la zona norte del país.

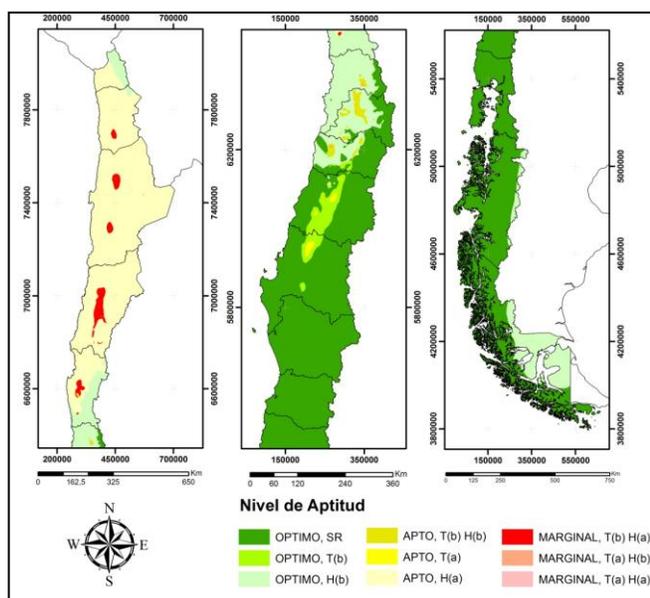


Figura 9: Aptitud climática madi.

El territorio nacional con aptitud climática apta para el madi abarca una superficie total de 27.042.910 hectáreas correspondiente al 35,8% de la superficie nacional y los terrenos clasificados con aptitud climática marginal abarcaron el 1,5% del territorio con 1.111.468 hectáreas. La distribución del territorio con aptitud climática del madi tiene relación con la distribución nativa propuesta por Donoso (1982), por lo tanto es factible señalar que a diferencia de la temperatura, el factor hídrico es el parámetro determinante en la adaptabilidad de la especie madi (González *et al.*, 2008b).

c. Zonificación de aptitud geomorfológica

La zonificación geomorfológica de madi, presenta una distribución homogénea de las categorías de aptitudes de tierra óptima, apta y marginal en el diferencial de altitud que presenta el país. Para la zona norte y centro norte se aprecian terrenos de mayor aptitud adaptativa en los sectores de menor altitud y los terrenos de aptitud marginal se sitúan en la alta cordillera (figura 10). Para la zona centro los terrenos con aptitud apta y marginal permiten visualizar los sectores en la cordillera de los andes en color rojo y en la cordillera de la costa en amarillo, la aptitud óptima se mantienen en sectores de baja elevación prefiriendo las depresiones intermedias. La zona sur se presenta como el sector de menor homogeneidad en la clasificación abarcando áreas con aptitud optima y apta sin un patrón definido.

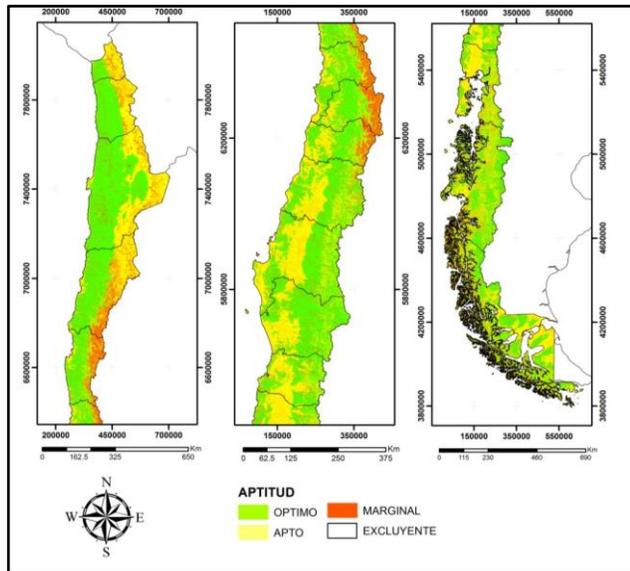


Figura 10: Aptitud geomorfológica madi.

El área con aptitud geomorfológica óptima abarca una superficie de 35.491.970 hectáreas equivalentes al 47% de la superficie del territorio nacional, distribuidas en las zonas norte, centro y sur. La zona con tierra apto para el cultivo abarca el 38,2 % de la superficie nacional con 28.849.912 hectáreas distribuidas en las zonas norte y centro. Los terrenos con aptitud marginal abarcan el 14,9% con 11.248.137 hectáreas distribuidas en las zonas centro norte del país.

d. Zonificación de aptitud edafoclimática

La zonificación de la aptitud edafoclimática de madi, muestra una superficie con potencial adaptativo de 20.164.005 hectáreas, correspondientes al 26,6% de la superficie del territorio nacional, y que se concentra en la zona centro del país (figura 11). La variable suelo es limitante para el establecimiento de madi, y excluye al 73,4% del territorio nacional concentrando las áreas con potencial adaptativo a una zona comprendida desde la Región de Coquimbo hasta la Región de Los Lagos.

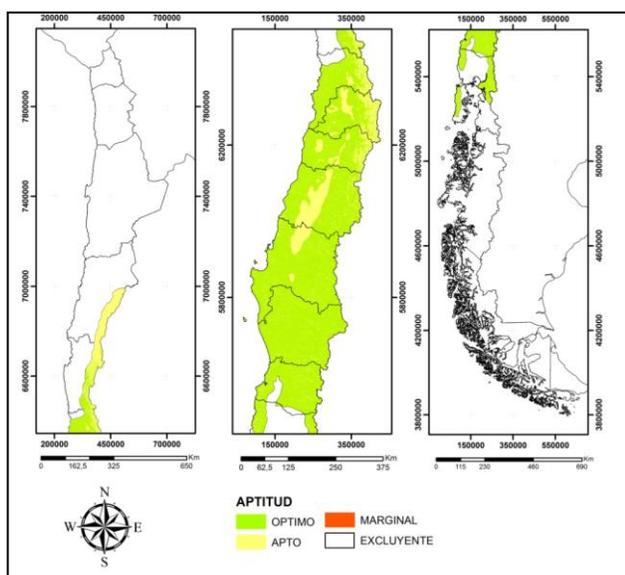


Figura 11: Aptitud edafoclimática madi.

El área con aptitud edafoclimática óptimo de madi abarca una superficie total de 16.023.458ha, que representa un 74,5% de la superficie con potencial adaptativo para el cultivo de madi y un 19,8% del territorio nacional (Figura 11). Los terrenos con potencial adaptativo óptimo se distribuyen en la zona centro desde la Región de Valparaíso hasta la Región de Los Ríos. Las áreas con aptitud de establecimiento apta se estiman en 5.145.415 hectáreas correspondiente al 25,5% de la superficie con potencial adaptativo y al 6,8% del territorio nacional. Los terrenos con aptitud marginal se estiman en 748 hectáreas 0,004% de la superficie que manifiesta potencialidad adaptativa y 0,001% del total del territorio nacional. Las superficies clasificadas con aptitud apta y marginal poseen una distribución hacia los sitios de alta cordillera para la zona centro norte del país específicamente en las regiones de Atacama y Coquimbo.

Zonificación agroecológica

Las zonificaciones agroecológicas se expresan a nivel regional en las figuras 12, 13 y 14 para la especie chañar y en las figuras 15, 16, 17, 18, y 19 para la especie madi. El detalle de la superficie estimada para ambas especies se muestra en el apéndice 6 y 7.

Las variables restrictivas de la zonificación agroecológica, clasificadas en altas (a) y bajas (b) expresan la restricción de la variable agroecológica definida desde los rangos para el cual se origina la restricción, es decir, para las restricciones térmicas bajas expresadas en la zonificación agroecológica se muestran con el término “T(b)” manifestando el rango en que la especie posee una adaptabilidad media expresada mediante un distanciamiento de 5°C del rango térmico óptimo en el que se desarrolla la especie. La restricción térmica alta identificada con el término “T(a)” manifiesta una condición de adaptabilidad bajo para la especie expresada mediante un distanciamiento del rango óptimo de hasta 10°C¹⁰. La ausencia de restricción expresa la alta adaptabilidad de la especie en esa variable.

La restricción hídrica clasificada en baja restricción hídrica “H(b)” y alta restricción hídrica “H(a)” derivan su significado de los valores establecidos en la regla de decisión de la variable hídrica. La baja restricción hídrica en la zonificación agroecológica de la especie chañar representa zonas donde la precipitación media anual fluctúa entre los 50 y los 100mm, donde la evapotranspiración media anual del chañar es de 1220mm (Santibáñez, 2011) se establece que la baja restricción hídrica para el chañar “H(b)” representa territorios con un déficit hídrico fluctuante entre los 1120 a 1170mm. La alta restricción hídrica “H(a)” en la especie chañar presenta un déficit hídrico mayor a 1170mm anuales.

La baja restricción hídrica para la especie madi “H(b)” corresponde a un déficit hídrico de hasta los 465mm y la alta restricción hídrica “H(a)” presenta un déficit hídrico por sobre los 465mm anuales.

La restricción de geoforma o relieve, se describe como una combinación de la limitante altitudinal para el cultivo de la especie y los terrenos con pendientes muy empinadas. La baja restricción de geoforma denominada “G(b)” en la especie chañar, representa zonas del terreno donde la altitud se aleja del rango óptimo de establecimiento de la especie hasta 500msnm aproximado con pendientes de 20 a 40° de inclinación. En la especie madi la misma restricción representa zonas con un distanciamiento de hasta 500msnm aproximado del rango óptimo de altitud y pendientes con 30 a 40° de inclinación.

La alta restricción de geoforma “G(a)” en el chañar representa altitudes por sobre los 2875msnm y menores a los 3000msnm. En el madi la misma restricción “G(a)” expresa zonas del terreno donde la altitud se encuentra por sobre los 3000msnm o se encuentra por debajo de los 200msnm, con pendientes por sobre los 40° de inclinación.

¹⁰ Juan Manuel Uribe, 2013. [Entrevista personal]. Ingeniero Agrónomo experto en agro-climatología, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

i. Zonificación agroecológica chañar

La zonificación agroecológica de la especie chañar clasificó una superficie estimada en 7.900.728ha con aptitud para el cultivo, con 1.236.641ha de terrenos óptimos (15,7% del total con potencial), 6.438.778ha de terrenos aptos (81,5% del total con potencial) y 225.309ha de terrenos marginales (2,9% del total con potencial). En el cuadro 7 se observa el detalle la superficie con potencial de cultivo por macrozona y región a la que pertenece.

La macrozona norte ocupó 7.779.556ha de terrenos con aptitud agroecológica para el cultivo de chañar equivalentes al 98,5% del total de la superficie con potencial para el cultivo, el 1,5% restante se encuentra en la macrozona centro representada únicamente por la Región de Valparaíso con 121.171ha.

Cuadro 7: Superficie con aptitud agroecológica de chañar por macrozona

Macrozona	Región	Aptitud (ha)			TOTAL
		Óptimo	Apto	Marginal	
Norte	XV	2.235	280.075	19.919	302.229
	I	17.002	1.242.060	30.942	1.290.004
	II	198.103	3.072.776	53.310	3.324.189
	III	86.366	1.394.470	83.720	1.564.555
	IV	840.013	430.997	27.569	1.298.579
Centro	V	92.922	18.401	9.849	121.171
TOTAL		1.236.641	6.438.778	225.309	7.900.728

Fuente: Elaboración propia

La superficie con potencialidad para la adaptación de chañar (Figura 12), se clasifica en los terrenos aptos con una alta restricción hídrica 13,6% de la superficie regional (228.150ha), la alta restricción hídrica corresponde a precipitaciones medias anuales por debajo de los 50mm. Considerando que la evapotranspiración media anual del chañar es de 1220mm (Santibáñez, 2011), para que el chañar pueda adaptarse se debe satisfacer un déficit hídrico de 1170mm anuales. Los terrenos aptos con altas restricciones hídricas y baja restricción de geoforma abarcan un 2,9% de la superficie de la XV Región de Arica y Parinacota, correspondiente a 48.510ha (Figura 12). El 0,5% de la superficie de la XV Región se clasificó con aptitud marginal por contar con altas restricciones hídricas y de geoforma. Las categorías de aptitud marginal se presentan con superficies menores al 0,2% de la región. Se destaca la categoría de aptitud óptima sin restricción la cual presenta el 0,1% de la superficie total regional con 2.226ha de terreno. La XV Región presenta una alta potencialidad para el establecimiento de la especie chañar, donde el déficit hídrico es la principal limitante (Santibáñez, 2011). Los valles de esta región se describen como el hábitat natural de la especie (García y Ormazábal, 2008). Los sectores con condición de valles y a los cuales se les incorporó la variable de corrección hídrica, se clasificaron en zona óptima sin restricción, y representan una superficie cercanas a las 2.500 hectáreas. El 81,9% de la superficie de la XV Región de Arica y Parinacota se excluye por no presentar

potencial agroecológico para el establecimiento de chañar, los principales valles de Azapa, Lluta y Camarones se encuentran excluidos por presentar usos incompatibles con la zonificación (uso agrícolas).

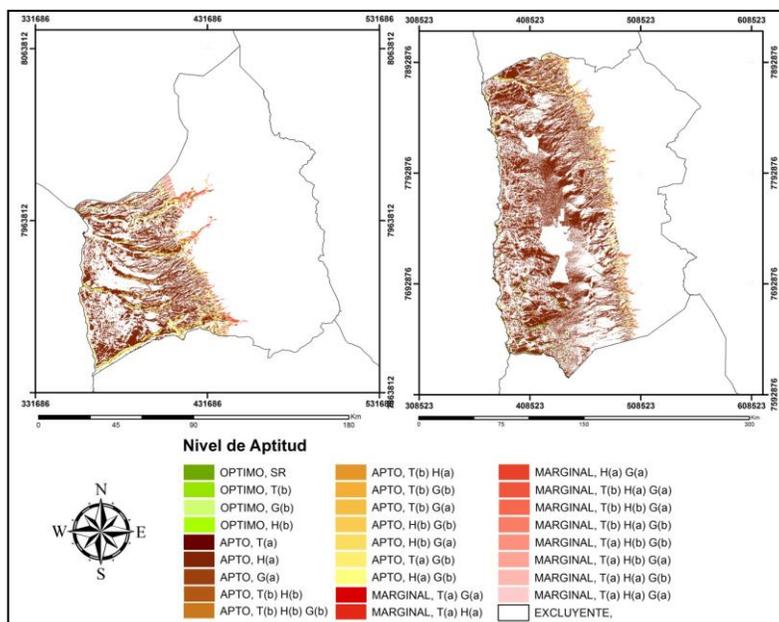


Figura 12: Zonificación agroecológica chañar regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá.

Dentro del potencial agroecológico total de la I Región de Tarapacá el 27,1% de la superficie correspondiente a 1.146.566 hectáreas presentan un aptitud apta con un alta restricción hídrica seguida del 2,2% de la superficie correspondiente a 93.880 hectáreas catalogadas en aptitud apta con restricciones hídricas altas y bajas de geoforma, el 0,7% de la superficie presentó aptitud marginal por poseer altas restricciones hídricas y de geoforma. Las aptitudes no descritas abarcaron superficies menores al 0,04%. La aptitud óptima sin restricciones ocupó el 0,4% de la superficie con 16.658 hectáreas presentes en las condiciones de valle que no poseen uso agrícola. Se excluye de potencial agroecológico para el establecimiento de chañar al 69,5% de territorio regional, correspondiente a sectores principalmente altiplánicos.

Los resultados obtenidos para la Región de Tarapacá no difieren de los obtenidos para la región antecesora debido a que las condiciones de clima y suelo se mantienen invariantes. Se destaca que en ambas regiones la aptitud térmica presenta sus mejores rangos adaptativos mientras que el déficit hídrico es el impedimento para el establecimiento del chañar. Zonificaciones realizadas por García y Ormazábal (2008) para representar de manera general el hábitat del chañar coinciden con la zonificación agroecológica generada en las regiones XV y I.

La II Región de Antofagasta presenta un 26,4% de su territorio con aptitud agroecológica para el establecimiento de chañar (Figura 13). Dentro de las categorías de aptitud la de

terreno apto con alta restricción hídrica predomina con un 22,6% de la superficie regional correspondiente a 2.851.697 hectáreas. La aptitud de suelo apta con alta restricción hídrica y baja restricción de geoforma además de la aptitud óptima sin restricción preside ambas con un 1,4% de la superficie lo que se traduce en 172.874ha y 180.014ha respectivamente. La aptitud apta con restricciones hídricas altas y bajas en el parámetro térmico disponen del 0,4% del territorio con 44.557ha. El 73,6% con 9.269.657 hectáreas de superficie regional se encuentra excluido por condiciones de altitudes mayores a 3000msnm y por disponibilidad de uso.

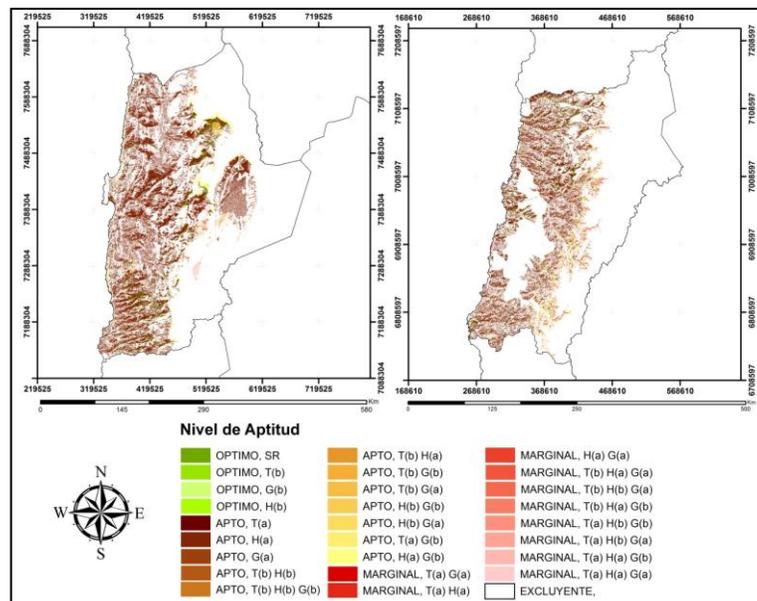


Figura 13: Zonificación agroecológica chañar regiones de Antofagasta y Atacama.

La III Región de Atacama presenta un 20,7% del territorio con potencialidad de establecimiento de chañar, donde el 15,8% de la superficie regional se identifica con aptitud apta y alta restricción hídrica correspondientes a 1.195.667 hectáreas (Figura 13). El 2,5% de la superficie regional 189.686 hectáreas abarcan una condición de aptitud apta con altas restricciones hídricas y leves restricciones de geoforma seguida de 1,1% (85.389ha) con aptitud óptima sin restricción correspondientes a las zonas de valle que no presentaban uso agrícola. El 1% de la región con 77.259 hectáreas presentó aptitud marginal con altas restricciones hídricas y de geoforma. Las aptitudes no descritas se distribuyeron en superficies menores al 0,1% del territorio, excluyendo el 79,3% por condiciones de altitud y uso del territorio.

En ambas regiones, de Antofagasta y Atacama, se puede apreciar la reducida presencia de los terrenos óptimos para la adaptación de chañar 1,4% y 1,1% de la superficie, terrenos ubicados en los valles no empleados en uso agrícola. Los principales valles del Huasco y Copiapó se encuentran en su mayor porcentaje de superficie excluidos al ser destinados para uso agrícola. La variable térmica sigue desplegando los rangos de mejor condición de adaptabilidad para la especie sin abarcar restricciones en este aspecto. La zonificación

realizada por García y Ormazábal (2008) para la identificación del hábitat natural de la especie se relaciona con superficie similar dentro de las regiones descritas.

La IV Región de Coquimbo presenta un 32,1% de su territorio con potencialidad de adaptación de chañar (Figura 14). El 20,8% de la superficie regional (840.012ha) se clasificó con potencial óptimo para el establecimiento del cultivo, dentro de la categoría de adaptación óptima el 10,5% de la superficie regional (426.889ha) no posee restricción terrenos ubicados en la provincia de Choapa. El 6,9% de la superficie (280.331ha) se clasifica óptima con leve restricción hídrica. El 3% de la superficie (120.526ha) se clasifica óptima con leve restricción de geoforma y el 0,3% (12.265ha) presenta una restricción térmica leve.

El 10,6% de los terrenos de la región (430.997ha), se clasificaron con aptitud de suelo aptas para la adaptación de chañar, destacando aquellos con altas restricciones hídricas 5,3% (216.441ha).

Los terrenos con aptitud marginal alcanzaron el 0,7% de la región con 27.569 hectáreas y se excluyeron 2.749.152 hectáreas de la región correspondiente al 67,9% del territorio por variables restrictivas de altitud y disponibilidad de uso.

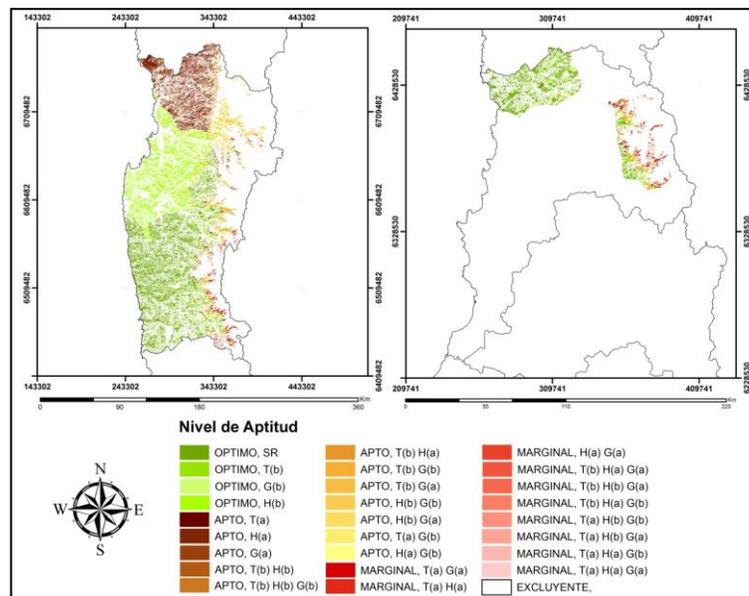


Figura 14: Zonificación agroecológica chañar regiones de Coquimbo y Valparaíso.

La V Región de Valparaíso presenta un 7,6% del territorio con potencial para el establecimiento de la especie chañar (Figura 14). El 5,8% de la superficie regional representado en 92.922 hectáreas presenta una aptitud óptima para el establecimiento de chañar, donde el 4% de la región (63.195ha) no presenta restricción y un 1,6% (25.769 ha) expresa leve restricción de geoforma.

El 15% del potencial adaptativo total correspondiente al 1,2% de la superficie de la región se identificó con aptitud apta y el 0,6% de la región correspondiente al 8,1% de la superficie con potencial adaptativo (9.848ha) se clasificó con aptitud marginal.

El 92,4% de la región correspondió a una zona de exclusión adaptativa. Las áreas formadas por las variables restrictivas en las aptitudes aptas y marginales expresaron superficies menores al 0,6% donde ninguna de ellas correspondió a una restricción con carácter hídrico.

La variación en los niveles de precipitación fue el factor determinante para que desde la IV región hacia el sur, los terrenos fueran clasificados, en su mayoría, como óptimos sin restricción, debido al cambio de clima de estepa a templado cálido (DMC, 2008), que condiciona y restringe el cambio de vegetación (Donoso, 1982). Otro factor de importancia es el parámetro de suelo el cual restringe la adaptabilidad, la especie chañar se establece en suelos de texturas arenosas (Ortiz, 1948; Bravo *et al.*, 2010), tipo de suelo que se presenta de forma reducida en la Región de Valparaíso (Luzio, 1997). Las descripciones sobre el hábitat natural del chañar, no identifican a la Región de Valparaíso como un lugar de establecimiento natural, y el límite de establecimiento se establece en la parte sur de la Región de Coquimbo (García y Ormazábal, 2008). La falta de coincidencia entre zonificación agroecológica presente y los estudios descriptivos de García y Ormazábal (2008) puede deberse a la escala de confección y a los parámetros incluidos en la investigación.

En base a la superficie de suelos fiscales a nivel regional, declarada en junio del 2011 por el Ministerio de Bienes Nacionales, se expresa que la mayor cantidad de suelos fiscales disponibles en las zonas con potencial de cultivo de chañar se encuentran en las regiones de Antofagasta (7.644.728ha), Atacama (4.465.853ha) y Tarapacá (3.120.442ha) seguidas de Arica y Parinacota (735.984ha), Coquimbo (10.399ha) y Valparaíso (35ha). Las regiones de Antofagasta, Atacama y Tarapacá presentan la mayor cantidad de superficie con aptitudes óptima sin restricción para establecer áreas de cultivo de chañar con 102.626ha, 59.586ha y 15.996ha respectivamente, el detalle de la superficie abarcada por las aptitudes óptimas, aptas y marginales se resumen en el cuadro 8.

Cuadro 8: Superficie fiscal con aptitud agroecológica de chañar

Región	Suelos Fiscales		Aptitud Óptima SR		Aptitud Óptima		Aptitud Apta		Aptitud Marginal	
	Ha		Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
XV	735.984		704	0,10	709	0,10	170.654	23,19	14.076	1,91
I	3.120.442		15.996	0,51	16.328	0,52	1.104.371	35,39	29.777	0,95
II	7.644.728		102.626	1,34	111.683	1,46	2.102.084	27,50	33.534	0,44
III	4.465.853		59.586	1,33	60.102	1,35	877.499	19,65	44.195	0,99
IV	10.399		1	0,01	2.029	19,51	1.287	12,38	16	0,15
V	35		15	42,86	15	42,86	0	0,00	0	0,00

Fuente: Elaboración propia

ii. Zonificación agroecológica madi

La zonificación agroecológica de la especie madi clasificó una superficie para el cultivo estimada en 7.240.451ha, con 4.815.900ha de terrenos óptimos (66,5% del total con potencial), 1.852.062ha de terrenos aptos (25,5% del total con potencial) y 572.489ha de terrenos marginales (7,9% del total con potencial). El cuadro 9 expresa el detalle de la superficie por macrozona y región a la que pertenece.

La macrozona norte abarcó 2.130.160ha con el 29,4% del potencial total del país, el 68,4% del potencial se ubicó en la macrozona centro con 4.956.691ha y la macrozona sur representada por la X Región de los Lagos posee 153.600ha de aptitud para el establecimiento de madi con el 2,1% del potencial.

Cuadro 9: Superficie con aptitud agroecológica para el madi por macrozona

Macrozona	Región	Aptitud (ha)			TOTAL
		Óptimo	Apto	Marginal	
Norte	III	669	432.544	428.899	862.112
	IV	509.189	617.102	141.757	1.268.048
	V	584.760	153.526	5	738.291
	RM	376.660	134.451	22	511.133
	VI	596.520	231.202	56	827.778
Centro	VII	1.105.292	153.421	426	1.259.139
	VIII	560.440	25.210	1.324	586.974
	IX	555.859	50.146	0	606.005
	XIV	390.873	36.498	0	427.371
Sur	X	135.638	17.962	0	153.600
TOTAL		4.815.900	1.852.062	572.489	7.240.451

Fuente: Elaboración propia

La III Región de Atacama presentó un 11,4% de superficie con potencialidad para el establecimiento adaptativo de la especie madi (Figura 15). El 5,7% de la superficie regional se clasificó con una aptitud marginal para la adaptación de cultivo, estos terrenos correspondiente al 49,7% de la potencialidad total del cultivo en la región abarcó una área de 428.899 hectáreas, donde las restricciones preponderantes correspondieron a altas restricciones hídricas y de geoforma. El 5,7% restante correspondió a terrenos catalogados aptos para el cultivo, zona representada en 432.544 hectáreas de terreno dentro de los cuales las restricciones hídricas son altas. El 88,6% de la región queda excluido sin potencialidad de adaptación debido a incompatibilidad en la variable edáfica. También existe presencia de terrenos con adaptabilidad óptima con restricciones bajas en los parámetros hídricos y de geoforma correspondiente al 0,01% de la superficie regional y al 0,1% de la zona con potencialidad adaptativo.

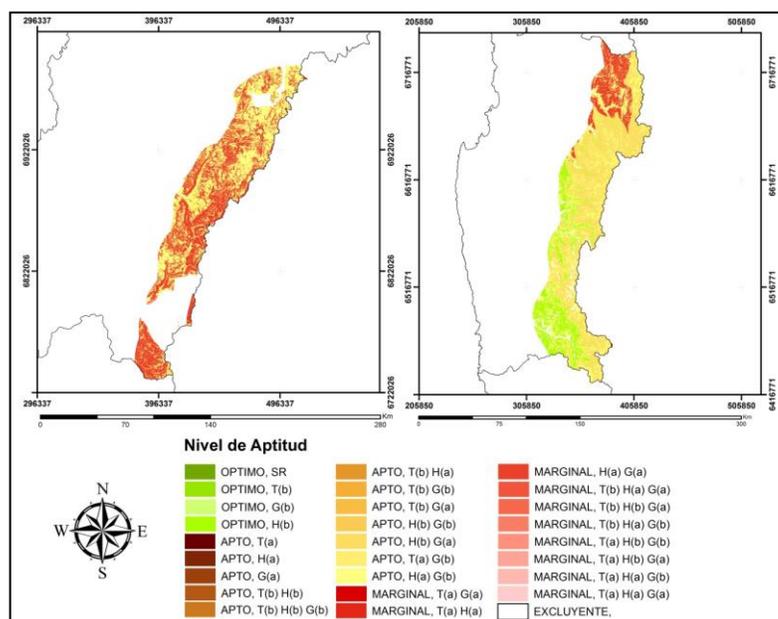


Figura 15: Zonificación agroecológica madi regiones de Atacama y Coquimbo.

La IV Región de Coquimbo presenta potencialidad para el establecimiento de la especie madi en un 31,3% de la superficie regional (Figura 15), los terrenos de aptitud óptima abarcan el 12,6% (509.189ha), distribuido en áreas con restricciones hídricas leves (4,6%) y áreas con restricciones hídricas y de geofoma leves (7,9%). El 15% de la superficie regional correspondió a una aptitud de adaptabilidad apta con 617.102 hectáreas y un 3,5% de la superficie potencial para el cultivo, 141.757 hectáreas se identificó con aptitud marginal, estas últimas presentan altas restricciones hídricas y de geofoma. El 68,7% de la superficie (2.788.110ha) fue excluida por limitación de la variable edáfica principalmente.

La distribución de los terrenos potenciales para el establecimiento de madi, en ambas regiones, ocupó los territorios a lo largo de la franja cordillerana por lo que las limitantes del uso del territorio no influyeron en las regiones como una variable determinante en el cultivo de la especie madi (Figura 15). La Región de Atacama agrupa a las mayores restricciones adaptativas del tipo hídrica y de geofoma, mientras en la IV Región de Coquimbo se aprecia un agrupación de las zonas de mayor marginalidad adaptativa en áreas cercanas al límite con la Región de Atacama y un agrupación de los terrenos con mayor adaptabilidad en áreas cercanas a la Región de Valparaíso, destacando que el nivel de adaptación óptima de la especie no se encuentra en la región.

La Región de Coquimbo ha sido documentada en los fenómenos climáticos por Morales *et al.* (2006) donde la región presenta un cambio de clima de estepa a templado (DMC, 2008) interviniendo en el cambio de vegetación y en mayor detalle en las especies que pueden adaptarse. El madi no presenta mayor inconveniente en la adaptación, se considera un especie que puede adaptarse tanto a clima de estepa como templado cálido presentando mayores niveles de adaptación en este último (Morales *et al.*, 2006; DMC, 2008). Los terrenos con características óptimas de adaptación coinciden con zonas cercanas a los valles

de Choapa y Limarí presentando restricciones leves en los parámetros hídricos y de geoforma.

La V Región de Valparaíso presenta un 46,1% del territorio con aptitud agroecológica para el establecimiento de madi (Figura 16). Los terrenos con aptitud óptima consideran el 36,5% de la superficie regional, correspondiente al 79,2% de la superficie con aptitud agroecológica en la región (584.760ha). El 21,1% de la superficie regional se clasificó como terrenos con aptitud óptima con presencia de baja restricción hídrica y se destacan 7.023 hectáreas óptimas para el cultivo sin restricción.

Los terrenos clasificados con aptitud apta abarcaron el 20,8% de la aptitud agroecológica de la región y el 9,6% del total regional con 153.526 hectáreas. El 5% del territorio correspondiente a 80.315 hectáreas de aptitud apta para el cultivo con presencia de bajas restricciones hídricas y de geoforma. Se excluyó un 53,9% de la región por limitaciones de suelo en la parte norte de la región y por disponibilidad de uso principalmente en la zona centro.

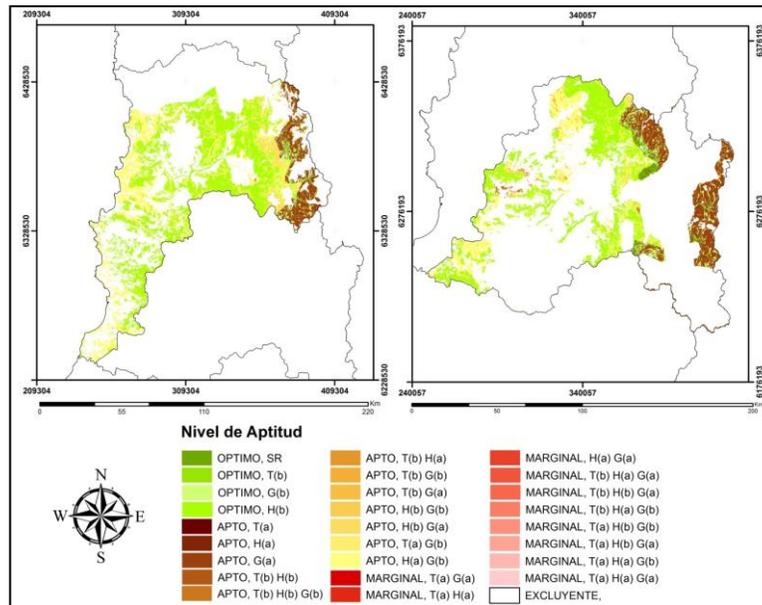


Figura 16: Zonificación agroecológica madi regiones de Valparaíso y Metropolitana.

La Región Metropolitana presenta un 33,3% con potencial para el establecimiento de la especie madi (Figura 16). El 24,5% de la superficie regional se clasificó con aptitud óptima correspondiente a 376.670 hectáreas dentro de las cuales 13,1% de la superficie regional presenta leves restricciones hídricas, el 4,9% agrupa restricciones leves hídricas y leves de geoforma y el 1,1% con 17.263 hectáreas no presenta restricciones. Los terrenos con aptitud apta ocuparon el 8,8% de la superficie regional, correspondiente a 134.451 hectáreas, donde el 6,5% son esteros con restricciones altas de geoforma. Los terrenos marginales abarcan superficies menores al 0,001% con 22 hectáreas y el 66,7% de la

superficie queda excluida de potencialidad para el establecimiento del madi por usos de suelo incompatibles.

La Región de Valparaíso y la Región Metropolitana tienen un alto nivel de potencialidad para el establecimiento de la especie, en ambas regiones la aptitud óptima alcanza aproximadamente la mitad del territorio con potencial de adaptación, destacando que la categoría óptima sin restricciones se encuentra con reducidas superficies del territorio. Los sectores con las peores condiciones de adaptación presentan un patrón de ubicación concentrándose en la zona cordillerana con el límite de Argentina, aludiendo a restricciones derivadas del relieve por el grado altitudinal y las condiciones de pendiente en el terreno.

La VI Región de O'Higgins presenta un 46,6% de la superficie regional con potencialidad para el establecimiento de la especie madi (Figura 17). El 36,3% de la superficie regional (596.520ha) presenta una aptitud agroecológica en el nivel óptimo, un 14,1% de la superficie (231.202ha) comparte un nivel de aptitud apta y el 0,003% (56ha) presenta una aptitud de terreno marginal para el establecimiento del madi.

Dentro de los terrenos clasificados con aptitud óptima el 17,3% (265.488ha) son los mejores terrenos por no poseer restricciones de adaptabilidad. El 5,4% de la superficie presenta una leve restricción hídrica, el 11,3% con leve restricción de geoforma y un 3,8% con ambas restricciones leves.

Otras categorías de aptitud presentaron terrenos por debajo del 2% de la superficie regional y el 53,1% del territorio queda excluido por condiciones de usos incompatibles.

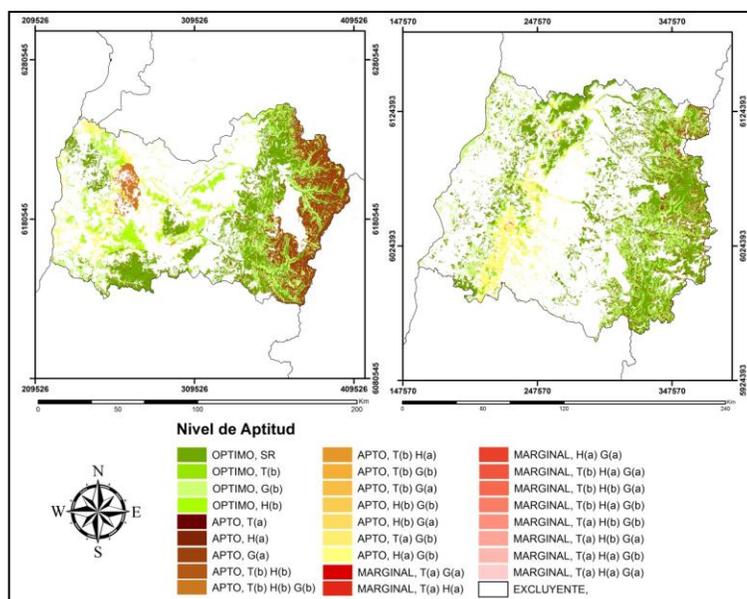


Figura 17: Zonificación agroecológica madi regiones de O'Higgins y Maule.

La VII Región del Maule tiene 1.237.454,7 hectáreas, equivalente a 41,5% de la superficie regional, con aptitud para el establecimiento de la especie madi (Figura 17). El 36,4% de la

superficie regional presenta aptitud óptima equivalente a 87,8% del total adaptativo de la región, el 5,1% de la superficie posee aptitud apta.

Los suelos óptimos se clasificaron en sin restricciones correspondientes al 19% de la superficie de la región seguida de 12,7% de la superficie con una restricción de geoforma leve. La categoría de aptitud apta destaca un 0,4% con alta restricciones de geoforma y leve restricción térmica. La superficie excluida abarcó el 58,5% con 1.776.853 hectáreas correspondientes a valles de interior y valles costeros los que se consideraron sin potencialidad de establecimiento de la especie por restricción de uso.

Las regiones de O'Higgins y del Maule presentaron cerca del 36% de la superficie, clasificada como terrenos óptimos. El 16% y 19% de la superficie de cada región respectivamente se clasificó óptimo sin restricción, siendo estos los mejores terrenos para el cultivo de la especie. La Región del Maule presenta 575.330ha de superficie para la adaptación óptima sin restricciones situados en la provincia de Curicó. Los terrenos marginales 426ha se identifican para los sectores de alta cordillera cercanos al límite con Argentina.

La VIII Región del Biobío presenta un 17,1% de la superficie regional con potencialidad para el establecimiento de la especie madi (Figura 18), donde el 15,1% de la superficie regional (560.440ha) representan terrenos con aptitud de suelo óptimo, el 2% (73.067ha) representan terrenos con aptitud apta y el 0,04% (1,324ha) representan a los terrenos marginales.

Dentro de los terrenos clasificados con aptitud óptima el 6,9% de la superficie regional presenta una restricción baja de geoforma y un 6,8% corresponde a terrenos sin restricción siendo estos los mejores para el cultivo de la especie. Los terrenos con aptitud apta y marginal abarcaron superficies menores al 1,5% y se excluyó un 82,9% de la superficie regional por concepto de usos del territorio incompatible.

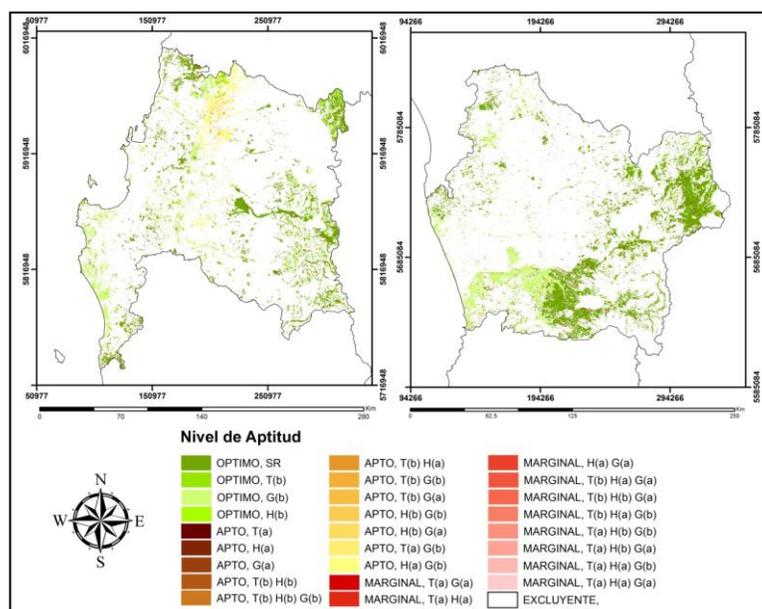


Figura 18: Zonificación agroecológica madi regiones del Biobío y Araucanía.

La IX Región de la Araucanía presenta un 19% de superficie con potencialidad de adaptación en la especie madi (Figura 18), donde el 17,4% de la superficie de la región (555.859ha) representa terrenos con aptitud óptima para la adaptación de la especie equivalentes al 91,7% del total adaptativo regional. El 1,6% de los terrenos de la región (50.146ha) representaron a las aptitud apta y no hay presencia de terrenos marginales.

El 12% de los suelos de clasificados con aptitud óptima para el cultivo no presentan restricciones y el 5,4% restante presenta baja restricción de geoforma. Los suelos clasificados en aptitudes aptas se presentan solo con la alta restricción de geoforma en el 1,6% de la superficie. La superficie excluida correspondió al 81% de la superficie regional.

Las regiones del Biobío y la Araucanía presentaron una alta superficie para la adaptación de la especie en la aptitud óptima territorio 88,28% (560.440ha) y 91,7% (555.859ha) del potencial adaptativo de cada región respectivamente. Todas las zonas clasificadas presentan una alta segregación observable atribuible a la gran cantidad de áreas con protección nacional (parques, reservas, monumentos) los cuales reducen la continuidad de las áreas y generan un efecto de fragmentación.

La XIV Región de los Ríos presenta un 23,2% de la superficie regional equivalente a 427.371ha con potencialidad para la adaptación de la especie madi (Figura 19). El 21,2% de la superficie regional (390.873ha) corresponden a terrenos con aptitud óptima, seguida del 2% (36.498ha) para terrenos con aptitud apta, la aptitud marginal no se presenta y la superficie excluida equivale al 76,8% del territorio regional por incompatibilidad de usos y características de geoforma.

Los terrenos clasificados con aptitud óptima en la Región de los Ríos el 12,9% presenta una restricción baja de geoforma equivalente al 21,2% de la superficie con potencialidad

adaptativa, seguida de un 8,3% de terrenos óptimos sin restricción. Los suelos aptos 2% del territorio regional se presentan con alta restricción de geoforma.

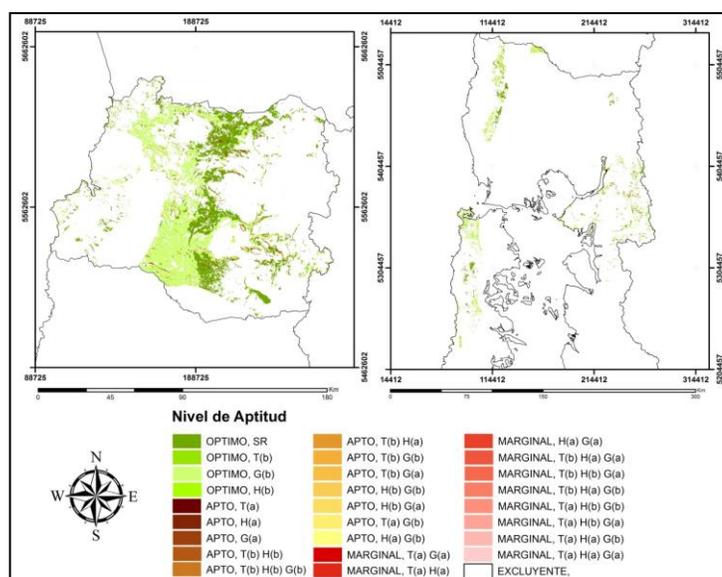


Figura 19: Zonificación agroecológica madi regiones de Los Ríos y Los Lagos.

La X Región de los Lagos presenta 3,2% de la superficie regional con potencialidad para el establecimiento de la especie madi (Figura 19). El 88,3% de la superficie con potencial adaptativo correspondiente a 135.638 hectáreas representadas en un 2,8% de la superficie regional expresa una aptitud óptima de adaptabilidad, de las cuales el 20,4% de la superficie con potencialidad correspondiente a 31.308 hectáreas representadas en el 0,6% de la superficie regional presentan aptitud optima sin restricción y el 2,2% con restricción de geoforma baja. Los terrenos de aptitud apta abarcan el 11,7% de la superficie con potencialidad adaptativo representada en un 0,4% de la superficie de la región con 17.962 hectáreas, la aptitud marginal no está presente y se excluyeron 4.666.802 hectáreas el 96,8% de la superficie de la región.

Ambas regiones expresan el límite adaptativo de la especie con la salvedad que este límite no es expresado por un cambio en las condiciones climáticas. FAO (1997) en la zonificación agroecológica expresa que al establecer clasificaciones de rangos es posible observar visualmente una degradación de ellos en las zonas de adaptación climática límite, la falta de este degradación se puede interpretar como la intervención de variables externas, en este caso las variables que intervienen y limitan el territorio potencial son el factor suelo y la disponibilidad de uso. Se destaca también para ambas regiones que las restricciones con una mayor superficie abarcada corresponden a la de geoforma.

En base a la superficie de suelos fiscales a nivel regional, declarada en junio del 2011 por el Ministerio de Bienes Nacionales, se expresa que la mayor cantidad de suelos fiscales disponibles en las zonas con potencial de cultivo de madi se encuentran en las regiones de Atacama (4.465.853ha), Los Lagos (490.025ha) y La Araucanía (37.000ha) seguidas de

Coquimbo (10.399ha), Metropolitana (10.186ha), O'Higgins (121ha), Biobío (97ha), El Maule (89ha), Los Ríos (58ha) y Valparaíso (35ha). Las regiones de la Araucanía y Los Lagos presentan la mayor superficie con aptitud óptima sin restricción en suelos fiscales para el cultivo de madi con 8.824 y 2.717 hectáreas respectivamente, ambas regiones también poseen 12.178 y 9.513 hectáreas de suelos fiscales clasificados con aptitud óptima. La mayor superficie de suelos fiscales aptos para el cultivo de madi se concentra en la Región de Atacama con 217.335ha. El detalle de la superficie abarcada por las aptitudes óptimas, aptas y marginales se expresan en el cuadro 10.

Cuadro 10: Superficie fiscal con aptitud agroecológica

Región	Suelos	Aptitud		Aptitud		Aptitud		Aptitud	
	Fiscales	Optima	SR	Óptima		Apta		Marginal	
	Ha	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
III	4.465.853	0	0,00	0	0,00	217.335	4,87	139.706	3,13
IV	10.399	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
V	35	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
RM	10.186	0	0,00	20	0,20	9	0,25	0	0,00
VI	121	0	0,00	11	9,09	0	0,00	0	0,00
VII	89	5	5,62	11	12,36	0	0,00	0	0,00
VIII	97	4	4,12	17	17,53	0	0,00	0	0,00
IX	37.000	8.824	23,85	12.178	32,91	746	2,02	0	0,00
XIV	58	0	0,00	11	18,97	2	3,45	0	0,00
X	490.025	2.717	0,55	9.513	1,94	1442	0,29	0	0,00

Fuente: Elaboración propia

Las propuestas de zonificación agrícolas desarrolladas por Molino *et al.* (1988) y Aguilar-Rivera, *et al.* (2010) para distintas especies, concuerdan en la importancia y en la validez de la información basal de clima y suelo para el desarrollo de los modelos de aptitud en base a referencias específicas de cada especie. Sus propuestas al igual que el modelo utilizado para la zonificación de chañar y madi emplearon características térmicas, hídricas y edáficas como las variables determinantes para este tipo de zonificación. Otro tipo de modelos utilizados para la evaluación de tierras podrían generar resultados de mayor especificidad al utilizar la variable climática dominante, aun así independiente del modelo que se quiera emplear el punto clave se centra en la certeza de la información levantada para la especie a zonificar (Eastman, 2003). La escala de trabajo es otro punto fundamental para el posterior uso o fines prácticos de los resultados generados, Rossiter y Vargas (2004) concuerdan en que una escala 1:250.000 plantea una aproximación que debe ser utilizada a nivel regional, mediante la cual obtener información para el correcto uso del territorio. Información basal levantada a mayor resolución posibilita una escala de mayor precisión y un resultado de mejor calidad mediante el cual las decisiones respecto al territorio poseen un mayor grado de certeza.

Zonificación productiva.

Las zonificación productivas expresa la productividad obtenida en kilogramos de materia seca por hectárea anual y se estimó según el modelo de Monteith (1996). La productividad calculada y georeferenciada, para las especies chañar y madi, se muestran en las figura 20 y 21. El detalle para la productividad obtenida en cada región se muestra en los apéndices 4 y 5.

i. Zonificación productiva chañar.

La zonificación productiva para el chañar entre las regiones de Arica y Parinacota hasta Valparaíso se muestra en la figura 20. La XV Región presentó producciones del orden de los 19.000 – 15.000 (kg ms ha⁻¹) para las categorías de nivel óptimo, apto y marginal, mientras que las producciones más bajas cercanas a los 8.000 (kg ms ha⁻¹) se conservaron para la mayoría de las aptitudes de terreno marginales.

Las categorías de aptitud que presentaron las producciones más altas en la XV Región en su mayoría poseen una alta restricción hídrica. En cambio las producciones más bajas se presentaron en los terrenos clasificados marginales con alta restricción térmica.

La I y II Región presentaron productividades entre los 19.000 – 16.000 (kg ms ha⁻¹) en las aptitudes optimas, aptas y marginales con restricciones altas y bajas en las variables de geoforma e hídricas. Las productividades más bajas para las regiones I y II fueron del orden de entre los 12.000 – 8.000 (kg ms ha⁻¹) en aptitudes aptas y marginales ambas con restricciones térmicas altas y bajas.

La III y IV Región se observa el mismo patrón de comportamiento que en las regiones anteriores con las mayores productividades de entre los 19.000 a 16.000 (kg ms ha⁻¹) en la aptitudes optima y apta, y las productividades menores 12.000 a 8.000 (kg ms ha⁻¹) en los suelos clasificados marginales.

La V Región registro las mayores productividades del orden de los 17.000 (kg ms ha⁻¹) en la aptitud óptima sin restricción y también en suelos óptimos con baja restricción de geoforma, las productividades más bajas en esta región alcanzan los 8.000 (kg ms ha⁻¹ d⁻¹) y se relacionan con restricciones térmicas altas.

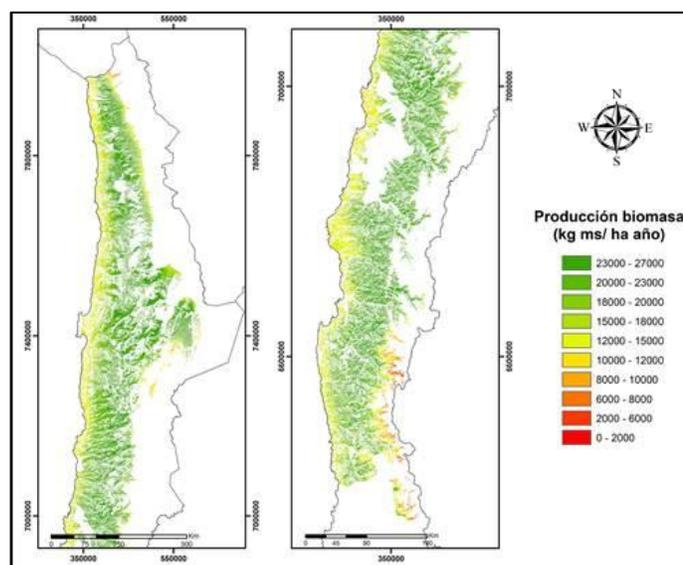


Figura 20: Zonificación productiva cañar.

En la productividad del cañar se destaca una relación proporcional con la variable térmica, donde una mayor producción en toda el área de potencialidad de establecimiento de la especie se relacionó con temperaturas altas y donde la falta de estas reducía drásticamente la producción obtenida. Al comparar las distribuciones obtenidas entre la función térmica y la aptitud térmica ambas se asemejan identificando como zona de alta productividad a las regiones XV hasta la VIII Región. En cambio las similitudes son menores para la función hídrica con la aptitud hídrica donde las zonas de alta productividad se concentran en las regiones norteañas XV, I, II y III. La productividad promedio para cada categoría de aptitud agroecológica se encuentra en el cuadro 11.

Cuadro 11: Productividades regionales cañar

Región	Productividad (kg ms ha ⁻¹)		
	Media	Máxima	Mínima
XV	14.026	19.345	8.030
I	15.736	18.980	8.030
II	14.978	18.980	8.943
III	14.846	18.980	8.030
IV	14.914	18.980	8.030
V	12.532	17.155	8.030

Fuente: Elaboración propia

Las mayores productividades coincidieron en las aptitudes óptimas seguidas de las aptas y por último las marginales. La productividad en las seis regiones adaptativas de la especie cañar se mantuvo en el orden de los 16.790 (kg ms ha⁻¹) para la aptitud óptima sin

restricción, donde la Región de Arica y Parinacota presentó la mayor producción potencial de chañar con 19.345 (kg ms ha⁻¹).

ii. Zonificación productiva madi.

La zonificación productiva para la especie madi (Figura 21) expresa la productividad obtenida en un periodo de 3 meses en kilogramos de materia seca por hectárea para las regiones de Atacama hasta la Región de los Lagos. La III y IV región presentaron producciones máximas de hasta 5.000 (kg ms ha⁻¹) en categorías de aptitud apta, óptimo y marginal donde la restricción térmica es nula, las productividades menores a 2.000 (kg ms ha⁻¹) se presentaron en aptitudes marginales y aptas con presencia de restricciones térmicas altas y bajas. Desde la Región de Valparaíso hacia el sur la productividad máxima alcanzable llega a los 4.500 (kg ms ha⁻¹) aproximado, y es alcanzada en los terrenos de aptitud óptima siendo los terrenos catalogados con aptitud marginal los que alcanzan las producciones menores en cada región, esta producción bordea los 900 (kg ms ha⁻¹).

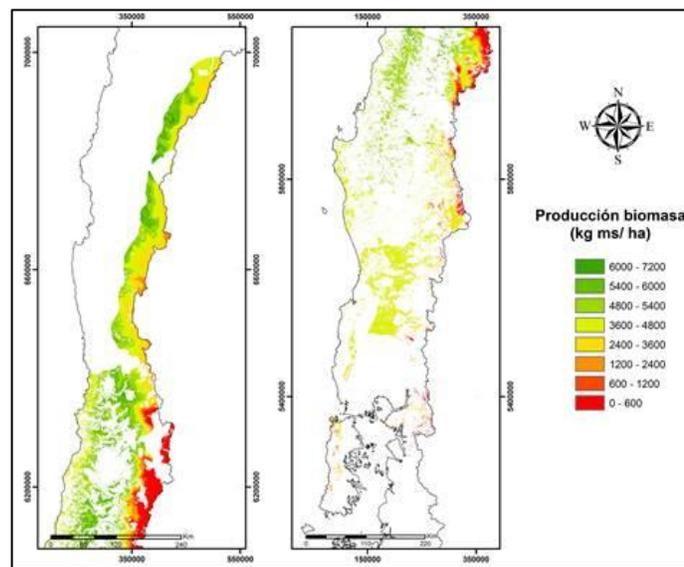


Figura 21: Zonificación productiva madi

En base a las productividades obtenidas para la especie madi con el modelo de producción se destaca la relación proporcional con la variable térmica, donde una mayor producción se encuentra relacionada con altas temperaturas. Las mayores producciones de madi se encuentran en las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule.

La productividad promedio detalladas en el cuadro 12 coinciden en la zonificación agroecológica, los valores más altos de producción se sitúan en los terrenos con aptitudes óptimas, seguidas de las aptitudes aptas y por último las aptitudes de suelo marginales. La Región de Atacama presenta la producción promedio más altas con 4.388 (kg ms ha⁻¹) en la categoría de aptitud apta, esta región no presenta aptitudes óptimas. La Región del Coquimbo preside con productividad promedio de 3.960(kg ms ha⁻¹) para la aptitud óptima,

seguidas de la Región del Maule con 3.915 (kg ms ha⁻¹), Valparaíso, RM y O'Higgins con 3.798 (kg ms ha⁻¹).

Cuadro 12: Productividades regionales madi

Región	Productividad		
	Media	Máxima	Mínima
III	1.584	1.905	1.094
IV	1.365	1.767	709
V	1.477	1.877	774
RM	1.391	1.777	707
VI	1.544	1.757	1.181
VII	1.612	1.841	975
VIII	1.428	1.712	922
IX	844	896	813
XIV	844	906	787
X	669	695	638

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La investigación realizada utilizó una metodología en base a SIG y EMC para identificar niveles de aptitud y restricción en los parámetros térmicos, hídricos y de suelo, que permitió clasificar e identificar en Chile áreas con potencial para el desarrollo de las especies chañar y madi. Sin embargo, para establecer la aptitud productiva de los cultivos de las especies chañar y madi, se utilizó un análisis de variables agroecológicas que se consideraron de importancia para el crecimiento de las especies.

La zonificación agroecológica del chañar clasificó, en todo el territorio nacional, una superficie de 7.900.728ha con aptitud para el establecimiento de esta especie. Esta superficie se divide en 1.236.641ha de terrenos óptimos (15,7% de la superficie total), 6.438.778ha de terrenos aptos (81,5% de la superficie total) y 225.309ha de terrenos marginales (2,9% de la superficie total).

La macrozona norte de Chile, incluye las regiones XV, I, II, III y IV, y se identifica como el área de mayor potencial para el establecimiento del chañar en el país, con un total de 7.779.556ha (98,4% de la superficie total). La macrozona centro, está representada por la V Región de Valparaíso, y tiene una superficie potencial para el establecimiento del chañar de 121.171ha (1,5% de la superficie total).

Los terrenos con potencial para el establecimiento del chañar se ubican en sectores de valles y laderas cercanas a los fondos de valle que aseguren un suministro agua. La disponibilidad de agua, y el tipo de suelo, son variables consideradas determinante en la clasificación del potencial para el establecimiento del chañar en Chile. El chañar aunque es una especie tolerante a condiciones extremas de sequía, necesita una fuente de agua para asegurar su desarrollo óptimo. En la macrozona norte, el factor hídrico es restrictivo y afecta 6.698.145ha (86,1% de la superficie potencial) y en la macrozona centro, el factor restrictivo cambia a relieve afectando 51.332ha (42,3% de la superficie potencial).

Los sectores de valles en la macrozona norte, son terrenos destinados al cultivo de especies agrícolas con fines alimenticios, y presentan condiciones de humedad propicias para el desarrollo del chañar. Estos suelos por su condición de erosión, presentan sales, que limitan su uso en la agricultura tradicional, y representan 2.226ha en la XV Región de Arica y Parinacota, 16.658ha en la I Región de Tarapacá, 180.014ha en la II Región de Antofagasta, 85.389ha en la III Región de Atacama, 426.889ha en la IV Región de Coquimbo y 6.3195ha en la V Región de Valparaíso.

La zonificación agroecológica del madi clasificó dentro del territorio nacional, una superficie de 7.240.451ha con aptitud para el establecimiento de esta especie. Esta superficie se divide en 4.815.900ha de terrenos óptimos (66,5% de la superficie total), 1.852.062ha de terrenos aptos (25,5% de la superficie total) y 572.489ha de terrenos marginales (7,9% de la superficie total).

En la macrozona norte de Chile, tiene una superficie potencial para el establecimiento de madi de 2.130.160ha (29,5% de la superficie total), y el 99,9% de esta zona tiene restricción hídrica. La macrozona centro, tiene una superficie potencial para el establecimiento de madi de 4.956.691ha (68,4% de la superficie total), de los cuales 2.626.405ha (52,9% de la superficie total), la principal restricción de los suelos es en el relieve. La macrozona sur, representada por X Región de los Lagos, tiene una superficie potencial para el establecimiento de madi de 153.600ha (2,1% de la superficie total), de los cuales 122.292ha se excluyeron por sus características edáficas y tipos de suelos, debido a la alta presencia de campos de hielo y terrenos protegidos en calidad de parques y reservas naturales.

Los mejores terrenos para el cultivo de madi, suelos óptimos sin restricciones, se observan desde los sectores de precordillera de la VI Región de O'Higgins hasta la X Región de los Lagos. La VIII Región del Biobío y la X Región los Lagos, presentan un número considerable de reservas y parques nacionales, dedicados a la conservación de la flora y fauna endémica, por lo que se recomienda excluir esta área para el cultivo de madi, y evitar una fragmentación del medio ambiente por concepto de generación de cultivos bioenergéticos.

La zonificación agroecológica productiva de la XV Región de Arica y Parinacota, representa la superficie del territorio en el que el establecimiento de la especie chañar alcanza la mayor productividad estimada en 19.345kg ms ha⁻¹, principalmente por una mayor superficie del territorio no empleada, en algún uso, respecto a regiones como Coquimbo y Valparaíso, con potencialidad para el establecimiento y las cuales reducen el área zonificada por uso agrícola. Las regiones comprendida entre la XV y la IV Región, donde puede adaptarse el chañar, no difieren en las producciones máximas y mínimas obtenidas.

La zonificación agroecológica productiva para madi, estableció que las regiones que registran las máximas productividades corresponden a las regiones de Coquimbo 1.905kg ms ha⁻¹, Valparaíso 1.877kg ms ha⁻¹, y Metropolitana 1.777kg ms ha⁻¹.

La zonificación agroecológica presentada en este estudio para las especies chañar y madi representan una aproximación confiable para el establecimiento y uso de estas especies con fines energéticos en Chile.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, E., M. Espinosa, J. Cancino, R. Rubilar y F. Muñoz. 2010. Estimating the bioenergy potential of *Pinus radiata* plantations in Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 37(1): 93-102.
- Asociación Chilena de Energías Renovables. (ACERA). 2012. Las ERNC y su potencial contribución en generación. *In: Biobío Energía Expo2012*. Chile. 36p.
- Aguilar-Rivera, N., Galindo, G. Contreras, C. y Fortanelli, J. 2010. Productive zoning cañera in huasteca potosina, México. *Agronomía Tropical* 60(2): 139 - 154.
- Alvarado, A.; Baldini, A. y Guajardo, F. 2012. Árboles Urbanos de Chile. Programa de arborización: Un Chileno, un árbol. Editora Maval Ltda. Santiago, Chile. 380p.
- Angelini, L., E. Moscheni, G. Colonna, P. Belloni y E. Bonari. 1997. Variation in agronomic characteristics and seed oil composition of new oilseed crops in central Italy. *Industrial Crops and Products* 6(3-4):313-323.
- Arriaza, J. M. 2010. V Seminario Latinoamericano y del Caribe de Biocombustibles: Estado actual de los biocombustibles en Chile. Ministerio de Energía. Santiago 18 agosto 2010.
- BirdLife International 2012. *Eulidia yarrellii*. *In: IUCN 2012. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2012.2*. Disponible en: www.iucnredlist.org. Leído el 17 de Marzo de 2013.
- Benavides, A., P. Benjumea y V. Pashova. 2007. El biodiesel de aceite de higuerilla como combustible alternativo para motores diesel. *Dyna* 153:141-150
- Bravo, S., C. Kunst, R. Grau y E. Aráoz. 2010. Fire-rainfall relationships in Argentine Chaco savannas. *Journal of Arid Environments* 74: 1319 – 1323.
- Caballero, R. 2001. Macroeconomic Volatility in Latin America: A view and three case studies. *Estudios de Economía* 28(01):5-52
- Cabrera, A. 1971. Fitogeografía de la república Argentina. *Boletín d la Sociedad Argentina de Botánica* Vol XIV N°1-2. 50p
- Celedón-Neghme, C., W. González y E. Gianoli. 2007. Cost and benefits of attractive floral traits in the annual species *Madia sativa* (Asteraceae). *Evolutionary Ecology* 21(2):247–257.

- Codina, R., E. Manzano, S. Carrieri y S. Fioretti. 2003. Paisajismo sustentable en zonas áridas: Especies útiles para parquizaciones xéricas. Rev FCA UNCuyo Tomo XXXV N°2 33-44.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 2011. Estudio regional sobre economía de los biocombustibles 2010: temas claves para los países de América latina y el Caribe. Santiago, Chile. 100p
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Santiago, Chile. 148p.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 2008. Biocombustibles y comercio internacional: una perspectiva latinoamericana. Santiago, Chile. 31p.
- Comisión Nacional de Energía (CNE). 2008. Política Energética: Nuevos Lineamientos. Santiago, Chile. 108p.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 1999. Usos de Suelo. Esc. 1:250.000
- Cosio, F., Negrón, M., Gastó, J. y Villate, J. L. 2007. Distritos y sitios de la provincia templada secoestival nubosa o Valparaíso: secano de la costa. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal 7(1): 38-61.
- Dalmaso, A. 2010. Silvicultura urbana. Capítulo 2 II. Árboles apropiados para la provincia de Mendoza. Juca Editorial, Mendoza Argentina 66p.
- DS 366. Ministerio de tierras y colonización. Reglamenta explotación de quillay y otras especies forestales. Promulgado el 17 de febrero de 1944, publicado el 30 de marzo de 1944. 2p.
- Demirbas, A. 2005. Bioethanol from cellulosic materials: A renewable motor fuel from biomass. Energy Sources. 27:327-337.
- Delfino, M. y W. Gonzáles. 2005. A New Species of *Uroleucon* (Hemiptera: Aphididae) on *Madia* (Asteraceae) in Chile. Neotropical Entomology 34(2):221-225.
- Dicek, N. 2011. Patrimonio Verde Urbano. Municipalidad de Bahía Blanca, Imprenta Flore, Buenos Aires, Argentina. 94p.
- Di Castri, F. y Hajek, E. 1976. Bioclimatología de Chile. Editorial Vicerrectoría Académica – Universidad Católica de Chile, Santiago. 163p.
- Dirección Meteorológica de Chile (DMC). 2008. Guía Climática Práctica. Santiago, Chile. 117p.

- Donoso, C. 1982. Reseña ecológica de los bosques mediterráneos de Chile. *Bosque*, 4(2):117-146
- Eastman, J. 2003. IDRISI Kilimanjaro. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Manual versión 14.00. Clark Labs. Clark University. 312p.
- Echeverría, J. y J. Giuliatti. 2002. Incidencia del chañar en la producción bovina de San Luis. *Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA* 30(1):59-66.
- Espinoza, G. y Fuentes, E. 1991. Variabilidad de las precipitaciones y erosión episódica: Evidencias a distintas escalas en Chile central. *Pirineos* 137:65 – 77.
- Eynard, C. y L. Galetto. 2002. Pollination ecology of *Geoffroea decorticans* (Fabaceae) in central Argentine dry forest. *Journal of Arid Environments* 51 : 79–88.
- García, N. y C. Ormazábal. 2008. Árboles nativos de Chile. Enersis y Fundación Huinay. Santiago, Chile. 196p.
- García, J., R. Mandiús y L. Astrid. 2005. Evaluación edafoclimática de las tierras del trópico bajo colombiano para el cultivo de cacao. Mosquera, Colombia. 75p.
- Gastó, J., Silva, F. y Cosío, F. 1990. Sistema de Clasificación de Pastizales de Sudamérica. *Sistema en Agricultura*. Pontificia Universidad Católica de Chile. 9(1):1-92.
- González, A., I. Jiménez, M. Rodríguez, S. Restrepo y J. Gómez. 2008a. Biocombustibles de Segunda Generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes. *Revista de Ingeniería* 28:70 – 82.
- González, W., L. Suárez, M. Molina-Montenegro y E. Gianoli. 2008b. Water availability limits tolerance of apical damage in the Chilean tarweed *Madia sativa*. *Acta Oecológica* 34: 104-110.
- Gray, K., L. Zhao and M. Emptage. 2006. Bioethanol. *Concurrent Opinion in Chemical Biology*. 10:141 – 146.
- Groom, A. 2012. *Geoffroea decorticans*. In: IUCN 2012. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2012.2. Disponible en: www.iucnredlist.org. Leído el 17 de Marzo de 2013.
- Hermansen, C. 2010. Matriz Energética de Chile. ACTIC Consultores. Santiago, Chile. 35p.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2010. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiesel. San José, Costa Rica. 378p.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2007. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: I Bioetanol. San José, Costa Rica. 183p

Instituto Nacional de Estadística (INE). 2006. Compendio Estadístico 2006: Informa anual. 475p.

Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 2009. Inventarios Anuales de Gases de Efecto Invernadero de Chile: Serie Temporal 1984/2003 para Sectores No-Energía. (Bol. Tec. N°185), Centro Regional de Investigación La Platina, INIA. Santiago, Chile: INIA. 261p.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 2009. Manual de recolección sustentable de plantas aromáticas nativas de la región central y noroeste de la Argentina. Proyecto específico: Desarrollo de tecnologías innovativas para la exploración, conservación, evaluación y utilización de plantas aromáticas nativas. Buenos Aires, Argentina. 66p.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDEA). 2007. Biomasa: cultivos energéticos. Madrid, España. 57p.

International Energy Agency (IEA). 2012a. Oil & Gas Security. Emergency Response of IEA Countries. Paris, Francia. 37p.

International Energy Agency (IEA). 2012b. Key World Energy Statistics. Paris, Francia. 80p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. (Inf. Sin.) IPCC. Ginebra, Suiza: IPCC. 104p.

IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma. 130p.

Lasso, L. 1991. Zonificación agroclimática de los cultivos de mayor importancia económica del territorio colombiano. HIMAT. Bogotá, Colombia. 186p.

Lamarque, A., D. Maestri, J. Zygodlo y C. Guzmán. 2000. Chemical evaluation of *Geoffroea decorticans* seeds as source of oil and protein. *Grasas y Aceites* 51(4):241-243.

Lecaros, P. y H. Morales. 2006. Mercados eléctricos: Biocombustibles en Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. 25p

Ley N° 20.257. Introduce Modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales.

Publicada el 01 de abril de 2008.

Luebert, F. y P. Pliscoff. 2006. Sinopsis bioclimática de Chile. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 316p.

Luzio, W. y S. Alacyaga. 1990. Mapa de Asociaciones de grandes grupos de suelo. Esc. 1:6.000.000. [1]Lám. Blanco y negro 1p.

Luzio, W. y Alcayaga, S. 1992. Mapa de Asociaciones de grandes grupos de suelo. Revista Agricultura Técnica 52(4): 347 - 353.

Luzio, W. 1997. Clasificación de suelos. Universidad de Chile. 19p.

Maciel, C. 2009. Biocombustibles: Desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. Economía Informa 359:63-89.

Maestri, D., R. Fortunato, C. Guzmán, M. Torres y A. Lamarque. 2002. Seed compositional studies of some species of Papilionoideae (Leguminosae) native to Argentina. Journal of the Science of Food and Agriculture 82(3):248-251.

Maestri, D., R. Fortunato, J. Greppi y A. Lamarque. 2001. Compositional studies of seeds and fruits from two varieties of *Geoffroea decorticans*. Journal of Food Composition and Analysis 14(6):585-590.

Martín, G., M. Nicosia, M. Colombo y J. Lucas. sa. Fenología de floración y fructificación en leñosas nativas del chaco semiárido de tucuman y algunas consideraciones para su aprovechamiento forrajero. Argentina. 12p.

Masiero, G. y H. López. 2008. Etanol e biodiesel como recursos energéticos alternativos: perspectivas da América Latina e da Ásia. Revista Brasileira de Política Internacional 51(2):60-79.

Miller, G. y S. Spoolman. 2012. Living in the Environment. 17th edition. Canada: International Edition. 784p.

Ministerio de Energía. 2012a. Balance Nacional de Energía Año 2011. Santiago, Chile. 41p.

Ministerio de Energía. 2012b. Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2030 Energía para el futuro. Santiago, Chile. 38p.

Ministerio de Energía. 2011a. Balance Nacional de Energía Año 2010. Santiago, Chile. 60p.

Ministerio de Energía. 2011b. Chile y sus dilemas de política energética. Santiago, Chile.

25p.

Ministerio de Energía. 2011c. Manual de biogás. Santiago, Chile. 119p.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). 2011. Las áreas protegidas de Chile. Sierralta L., R. Serrano, J. Rovira y C. Cortés (eds). Santiago, Chile. 35p.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). 2005. Estrategia nacional para la conservación y uso racional de humedales en Chile. Santiago, Chile. 30p.

Molfino, J., A. Califra, C. Clérici y C. Petraglia. 1998. Zonificación de las tierras del Uruguay bajo dos sistemas de producción agrícola. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón, Chile. 18p.

Monteith, J. L. 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal* 88: 695-697p.

Morales, L., F. Canessa, C. Mattar, R. Orrego y F. Matus. 2006. Caracterización y zonificación edáfica y climática de la Región de Coquimbo, Chile. *Revista de las Ciencias del Suelo y Nutrición Vegetal* (3):52 - 74.

National Plant Data Center and the Rancho Santa Ana Botanic Garden (NRCS). 2003. Coast Tarweed *Madia sativa* Molina. USDA. 3p.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2010. Mapas de zonificación de aptitud productiva del territorio nacional de especies vegetales con potencial de producción de biocombustibles. Informe final. 235p.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2007. Contribución de la política agraria al desarrollo de los biocombustibles en Chile. Santiago, Chile. 140p.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). 2011. Perspectivas Agrícolas 2011-2020. OECD Publishing. 225p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1997. Zonificación Agroecológica. Guía General. Boletín de Suelos de la FAO N°73. 82p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1995. Global and National Soils and Terrain Digital Database (SOTER). *World Soil Resources Reports* 74(1):1- 141.

Ortiz, J. 1948. Flora Chilena, El Chañar, valiosa especie forestal resistente a los suelos salinos, revista el Campesino 19-20.

Ossa, F. 2012. Cultivos energéticos para biocombustibles. Instituto de Energía (IDE) -

Universidad Nacional de Cuyo (INCUYO) – Secretaria de Desarrollo Institucional (SDI). Mendoza, Argentina: IDE – INCUYO - SDI. 42p.

Pascual, A. B. Ruiz, P. Gómez, X. Flotas y B. Fernández. 2011. Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011 – 2020. Madrid, España. 104p.

Paneque, M., C. Román-Figueroa; R. Vásquez-Panizza; J.M. Arriaza; D. Morales y M. Zulantay. 2011. Bioenergía en Chile. Universidad de Chile - FAO. Santiago, Chile. 124p.

Pérez, J. y Balta, K. 2007. Ecología de la comunidad de saurios diurnos de la Reserva Nacional de Paracas, Ica, Perú. *Revista Biología de Perú* 13(3):169-176.

Raven, P. 1963. Amphitropical relationships in the floras of North and South America. *Quarterly Review of Biology* 38(2):151-177.

Reuter, A. 2006. Sistema de información geográfica: Operación-Análisis-Desarrollo-Proyectos. *Serie Didáctica* 26: 1-67.

Reynoso, M., N. Vera, M. Aristimuño, A. Daud y A. Sánchez. 2013. Antinociceptive activity of fruits extracts and “arropo” of *Geoffroea decorticans* (chañar). *Journal of Ethnopharmacology* 145:355-362.

Rodríguez, R., O. Matthei y M. Quezada. 1983. Flora arbórea de Chile. Editorial de la Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 408p.

Román, C., K. Vázquez, G. Martínez, G. Lillo, R. Fuster, A. de la Fuente, J.M. Uribe, L. Faúndez y M. Paneque (Ed). 2012. Cultivos energéticos, una apuesta de futuro. Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Laboratorio de Biotecnología Ambiental. Universidad de Chile. 224p.

Rossiter, D. G. y R. Vargas. 2004. Metodologías par el levantamiento del recurso suelo. 2da versión. 145p.

Rossiter, D. G. 1996. A theoretical framework for land evaluation. *Geoderma*. 72: 165-190.

Rossiter, D. G. 1994. Evaluación de Tierras. Cochabamba, Bolivia. 49p.

Ruiz, J. A. 2009. Seminario Internacional: Biocombustibles y su futuro en la matriz energética. Comisión Nacional de Energía. 5 de octubre 2009

San Martín, C., Y. Pérez, C. Ramírez, y M. Veste. 2011. El madi: una planta oleaginosa endémica de Chile con potencial bioenergético. 7mo Seminario Internacional: ¿Hacia dónde va la matriz energética en Chile y el mundo? Fundación Copec Universidad Católica 9 noviembre 2011 Santiago, Chile.

Santibáñez, C. 2011. Chañar (*Geoffroea decorticans*) oil as a prospective source of biodiesel in semiarid regions. *Current Opinion in Biotechnology* 22:15–152.

Schmeda-Hirschmann, G. 1995. *Madia sativa*, a potential oil crops of central Chile. *Economic Botany* 49(3):257–259.

Schneuer, D. 2010. Estudio exploratorio para la producción de bioetanol y coproductos de biorefinería, a partir de rastrojos de maíz. Memoria Ingeniero Civil Industrial e Ingeniero Civil en Biotecnología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 112 p.

Serna, F. L. Barrera y H. Montiel. 2011. Impacto social y económico en el uso de biocombustibles. *Journal of Technology Management and Innovation*. 6(1):100-114.

Sepúlveda, A y J.A. Yuri. 2010. Clima y calidad de fruta. Boletín técnico Pomáceas. Centro de Pomáceas. Universidad de Talca. 10(1):1-4.

Shichi, H. y Uritani, I. 1956. Alterations of Metabolism in Plants at Various Temperatures. Part 1: Mechanism of Cold Damage of Sweet Potato. *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 20: 284 – 288.

Silva, R., R. López de Ruiz y S. Ruiz. 2004. Estudio Fitoquímico de Flores de *Geoffroea decorticans* (Gill. ex Hook. et Arm.) Burk, *Leguminosae (Fabaceae)*. *Acta Farm. Bonaerense* 23(4):524 – 526.

Sotomayor, R. 2010. Estudio exploratorio de producción de bioetanol y de coproductos de biorefinería a partir de residuos de eucalipto. Memoria Ingeniero Civil Industrial e Ingeniero Civil en Biotecnología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 142 p.

Suárez, G. R. Florido, F. Soto y A. Caballero. 2013. Bases para la zonificación agroecológica en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao*, Lin) por medio del criterio de expertos. *Cultivos tropicales*. 34(2): 30-37.

Torres y Carrera, 2010. Informe Biocombustibles. Consultores de Comunicación. 20p

United States Department of Agriculture (USDA). 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. Undécima Edición 374p.

Uribe, J.M., R. Cabrera, A. de la Fuente y M. Paneque. 2013. Atlas bioclimático de Chile. Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Universidad de Chile. 228p.

Urrutia, O. 2010. El régimen jurídico internacional del cambio climático después del “Acuerdo de Copenhague”. *Revista de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de*

Valparaíso 34:597-633.

Vargas, H.; L. Parra y A. Hausmann. 2005. *Macaria mirthae*: Una Nueva Especie de Ennominae (Lepidoptera: Geometridae) de Chile. *Neotropical Entomology* 34(4):571-576.

Velásquez, J., G. Ochoa, J. Oballos, J. Manrique y J. Santiago. 2004. Metodología para la delineación cartográfica de suelos. *Revista Forestal Latinoamericana* 36:15 – 24.

Velásquez, J., Y. Olaya y C. Franco. 2009. Evidencias de Cambios Estructurales en el Precio Promedio Mensual del Petróleo del West Texas Intermediate (WTI). *Cuadernos de Administración*, 22(38):247-266.

Wauquier, J. 2004. El Refino del Petróleo: Petróleo crudo Productos petrolíferos Esquema de fabricación. Editorial Días de Santos. 467p.

Whaley, O., A. Orellana, E. Pérez, M. Tenorio, F. Quinteros, M. Mendoza y O. Pecho 2010. *Plantas y Vegetación de Ica, Perú: Un recurso para su restauración y conservación*. Royal Botanic Gardens, Kew. 96p.

Wilhem de Mösbash, E. 1992. *Botánica Indígena de Chile*. Editorial Andrés Bello. 140pp.
Shichi, H. y Uritani, I. 1956. Alterations of Metabolism in Plants at Various Temperatures. Part 1. Mechanism of Cold Damage of Sweet Potato. *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 20: 284-288.

Yoshida, S. 1984. Studies on Freezing Injury of Plant Cells. *Plant Physiol* 75: 38-42.

Zardini, E. 1992. *Madia sativa* Mol. (Asteraceae-Heliantheae-Madiinae): An ethnobotanical and geographical disjunct. *Economic Botany* 46(1):34-44.

APÉNDICES

APÉNDICE 1: Inventario de los parámetros agroecológicos y productivos para las especies chañar (*Geoffroea decorticans* [Gill. ex Hook. et Arn.] Burk.) y madi (*Madia sativa* Mol.)

Especie: Chañar

País	Provincia/Región	Localidad	Clima	Altitud (m.s.n.m.)	Temperatura (°C)				PPM (mm)	Textura	Soporta			
					TMA	TMmín	TMmáx	Tmín			Tmáx	Sal	Inu	Seq
Argentina	Salta		Desértico		12 a 18				150 a 200	arenosa				
Argentina	San Luis								450 a 550	arenosa				
Argentina	Buenos Aires		Chaco serrano	500 a 1300	20 a 23				500 a 800					
Argentina	Santiago del Estero	Parque los Quebrachos	Chaco semiárido						300 a 900		Sí			
Argentina	Mendoza		Desértico	1500 a 2000						arenosa	Sí			
Argentina	San Rafael	Región de piedmonte y de valle		<1200						arenosa		Sí	Sí	
Argentina	Córdoba	Las Toscas	Chaco Árido		18				500					
Argentina	Santiago del Estero		Chaco	190	19.8	10.6	30	-10	579					
Argentina	Mendoza	Reserva de Ñacuñán			15.6	7.6	23.8		326					
Chile	Coquimbo	Valle del Elqui			>10				104					
Chile	Arica a Coquimbo	Quebradas y planicies secas								arenosa	No	Sí		
Chile				0 a 3000		15.6	19.8	7.6	30.4	320	arenosa a arcillosa			
Chile	Arica y Choapa	Llanuras, oasis y quebradas	Árido y semiárido	0 a 3000										
Perú	Ica	Reserva Nacional de Paracas			18.7	15.5	22							

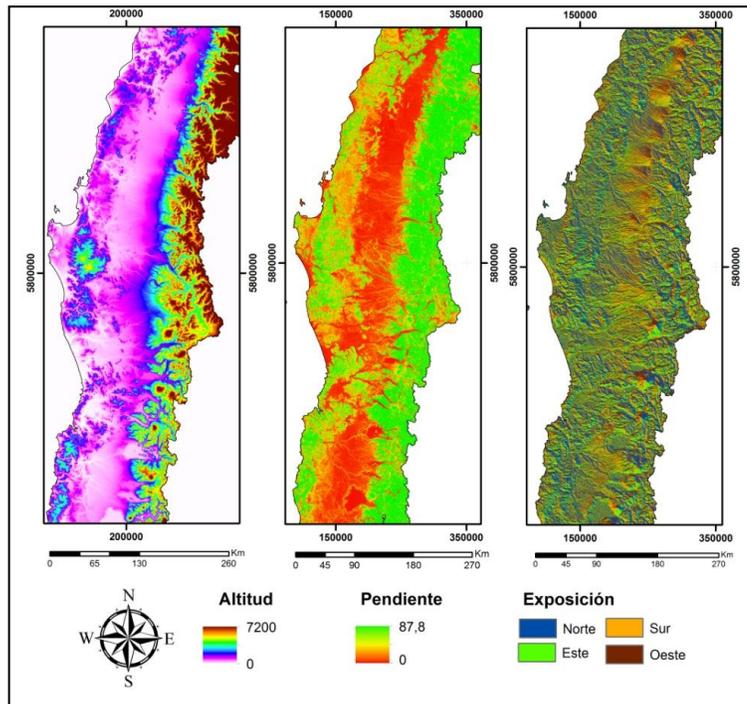
TMA: Temperatura media anual, TMmín: Temperatura media mínima, TMmáx: Temperatura media máxima, Tmín: Temperatura mínima, Tmáx: Temperatura máxima, PPM: Precipitación media, Sal: Salinidad, Inu: Inundación, Seq: Sequía, Hel: Helada

Especie: Madi

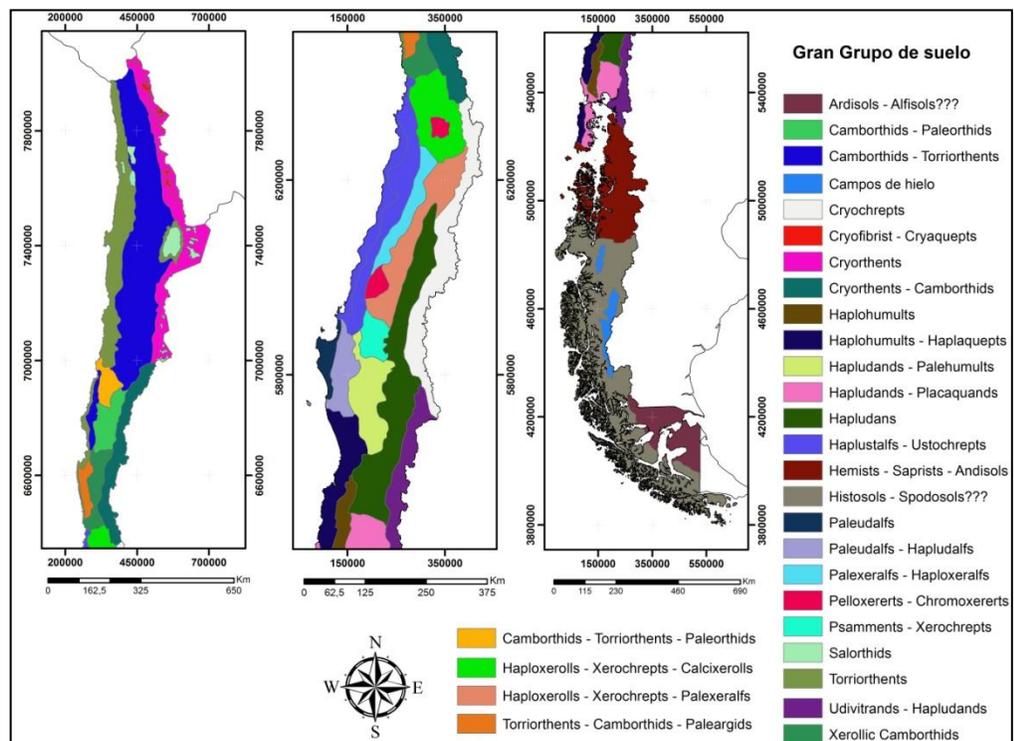
País	Provincia/Región	Localidad	Clima	Altitud (m.s.n.m.)	Temperatura (°C)				PPM (mm)	Textura	Soporta			
					TMA	TMmín	TMmáx	Tmín			Tmáx	Sal	Inu	Seq
Chile			Mediterráneo	2400					431				Sí	Sí
Chile		Farellones												
Chile			Alpino y mediterráneo	2400		12	24		431					
Chile													No	Sí
Chile				0 a 2400	12 a 24	9,5 a 16			620					
Chile	Magallanes	Punta Arenas		22	6				396					
Chile	-	Talcahuano		20	12				1283					
Chile	Curepto	Curicó		17	13				856					
Chile	Talca	Linares		105	14				699					
Chile	Balmaceda	Balmaceda		508	7				599					
Chile	Mauñín	Los Muermos		5	11				2189					
Chile	Río Seco	Río de Los Ciervos		39	6				488					
Chile	Limache	La Rudilla		108	14				508					
EEUU	California		Mediterráneo	<950										
EEUU	Alaska		Árido	<950										

TMA: Temperatura media anual, TMmín: Temperatura media mínima, TMmáx: Temperatura media máxima, Tmín: Temperatura mínima, Tmáx: Temperatura máxima, PPM: Precipitación media, Sal: Salinidad, Inu: Inundación, Seq: Sequía, Hel: Helada

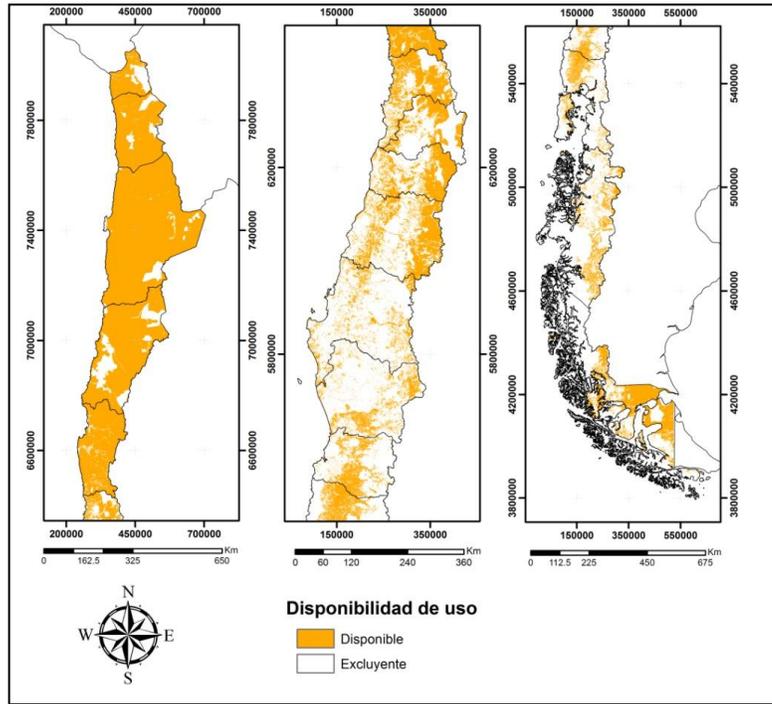
APÉNDICE 2: Modelos digitales de terreno.



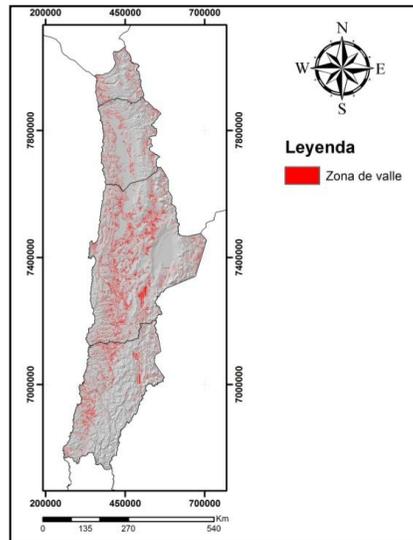
APÉNDICE 3: Cartografía de los grandes grupos de suelo.



APÉNDICE 4: Cartografía de disponibilidad de uso.



APÉNDICE 5: Cartografía de valles del norte de Chile.



APÉNDICE 6: Superficie estimada para la zonificación agroecológica para la especie chañar (*Geoffroea decorticans* [Gill. ex Hook. et Arn.] Burk.)

Zonificación: Agroecológica productiva chañar					
Región: Arica Y Parinacota					
Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/año]
OPTIMO	T(b)	3.6	0.0	11680	42191.3
OPTIMO	G(b)	4.8	0.0	17155	82624.7
OPTIMO	SR	2226.5	0.1	16790	37382881.4
APTO	T(a) G(b)	55.2	0.0	8943	493262.3
APTO	T(b) H(a)	1573.2	0.1	17885	28136844.4
APTO	T(b) H(b) G(b)	1194.6	0.1	16790	20057388.7
APTO	T(b) H(b)	189.7	0.0	10220	1938700.3
APTO	T(b) G(a)	370.8	0.0	13140	4872169.7
APTO	T(b) G(b)	30.0	0.0	12410	372414.0
APTO	H(a) G(b)	48510.7	2.9	18980	920732830.0
APTO	H(a)	228150.6	13.6	17885	4080473177.1
MARGINAL	H(a) G(a)	8730.1	0.5	19345	168883963.3
MARGINAL	T(a) G(a)	252.2	0.0	8030	2025246.8
MARGINAL	T(a) H(a)	6.0	0.0	12593	75815.6
MARGINAL	T(a) H(a) G(a)	318.6	0.0	12045	3837454.4
MARGINAL	T(a) H(a) G(b)	6.0	0.0	11498	69223.2
MARGINAL	T(a) H(b) G(a)	343.8	0.0	8394	2886206.9
MARGINAL	T(a) H(b) G(b)	94.7	0.0	8760	829922.5
MARGINAL	T(b) H(a) G(a)	4007.1	0.2	17520	70203729.4
MARGINAL	T(b) H(a) G(b)	3373.6	0.2	17703	59722047.5
MARGINAL	T(b) H(b) G(a)	2786.9	0.2	16790	46792864.5
EXCLUYENTE		1369442.9	81.9	0	0.0
TOTAL		1671671.7	100	294556	

Zonificación: Agroecológica productiva chañar					
Región: Tarapacá					
Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/año]
OPTIMO	H(b)	150.0	0.0	17885	2682357.4
OPTIMO	G(b)	193.6	0.0	17155	3320364.2
OPTIMO	SR	16658.7	0.4	16790	279699299.8
APTO	H(a)	1146566.6	27.1	17885	20506343844.2
APTO	H(a) G(b)	93880.1	2.2	18980	1781844316.9

APTO	H(b) G(a)	721.9	0.0	18798	13569810.0
APTO	H(b) G(b)	520.1	0.0	18980	9870762.2
APTO	T(a) G(b)	3.1	0.0	8943	27493.4
APTO	T(b) H(a)	221.6	0.0	17885	3964035.7
APTO	T(b) H(b)	49.0	0.0	10220	500947.9
APTO	T(b) H(b) G(b)	97.2	0.0	16790	1631899.5
MARGINAL	H(a) G(a)	28214.2	0.7	19345	545802993.4
MARGINAL	T(a) G(a)	19.6	0.0	8030	157390.4
MARGINAL	T(a) H(a) G(a)	71.4	0.0	12045	860127.9
MARGINAL	T(a) H(a) G(b)	6.0	0.0	11498	69223.2
MARGINAL	T(b) H(a) G(a)	1488.8	0.0	17520	26083258.3
MARGINAL	T(b) H(a) G(b)	782.0	0.0	17703	13843180.7
MARGINAL	T(b) H(b) G(a)	360.1	0.0	16790	6046242.7
EXCLUYENTE		2945371.1	69.5	0	0.0
TOTAL		4235375.0	100	283242	

Zonificación: Agroecológica productiva chañar

Región: Antofagasta

Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	12202.1	0.1	17155	209327494.0
OPTIMO	SR	180014.2	1.4	16790	3022438353.1
OPTIMO	T(b)	5886.5	0.0	11680	68754821.3
APTO	H(a)	2851697.2	22.6	17885	51002605218.8
APTO	H(a) G(b)	172874.0	1.4	18980	3281148384.1
APTO	T(a)	125.7	0.0	9308	1170395.6
APTO	T(a) G(b)	851.6	0.0	8943	7616242.6
APTO	T(b) G(b)	2670.1	0.0	12410	33135541.6
APTO	T(b) H(a)	44557.6	0.4	17885	796913106.7
MARGINAL	H(a) G(a)	18811.9	0.1	19345	363916934.9
MARGINAL	T(a) H(a)	682.6	0.0	12593	8595733.6
MARGINAL	T(a) H(a) G(b)	18369.7	0.1	11498	211215092.8
MARGINAL	T(b) H(a) G(a)	1743.5	0.0	17520	30546217.8
MARGINAL	T(b) H(a) G(b)	13702.0	0.1	17703	242567173.2
EXCLUYENTE		9269657.8	73.6	0	0.0
TOTAL		12593846.7	100	209695	

Zonificación: Agroecológica productiva chañar

Región: Atacama

Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	502.7	0.0	17155	8623351.8
OPTIMO	H(b)	465.6	0.0	17885	8326794.4
OPTIMO	SR	85389.8	1.1	16790	1433694889.9
OPTIMO	T(b)	8.0	0.0	11680	93388.8
APTO	H(a)	1195667.6	15.8	17885	21384514282.0
APTO	H(a) G(b)	189686.9	2.5	18980	3600256636.6
APTO	H(b) G(a)	6668.7	0.1	18798	125358580.3
APTO	H(b) G(b)	1389.0	0.0	18980	26363351.3
APTO	T(a) G(b)	3.2	0.0	8943	28603.0
APTO	T(b) G(a)	108.2	0.0	13140	1421092.8
APTO	T(b) G(b)	20.2	0.0	12410	250886.0
APTO	T(b) H(a)	871.3	0.0	17885	15583628.0
APTO	T(b) H(b)	11.6	0.0	10220	118827.9
APTO	T(b) H(b) G(b)	42.9	0.0	16790	719563.4
MARGINAL	H(a) G(a)	77259.1	1.0	19345	1494576678.9
MARGINAL	T(a) G(a)	2.6	0.0	8030	21113.4
MARGINAL	T(a) H(a)	56.5	0.0	12593	711681.7
MARGINAL	T(a) H(a) G(a)	634.8	0.0	12045	7646431.2
MARGINAL	T(a) H(a) G(b)	56.7	0.0	11498	651826.8
MARGINAL	T(a) H(b) G(a)	3.6	0.0	8394	30321.4
MARGINAL	T(b) H(a) G(a)	3163.2	0.0	17520	55418821.2
MARGINAL	T(b) H(a) G(b)	1975.3	0.0	17703	34969419.3
MARGINAL	T(b) H(b) G(a)	568.0	0.0	16790	9536242.6
EXCLUYENTE		5990731.5	79.3	0	0.0
TOTAL		7555286.9	100	341459	

Zonificación: Agroecológica productiva chañar

Región: Coquimbo

Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	120526.0	3.0	17155	2067624244.5
OPTIMO	H(b)	280331.7	6.9	17885	5013731632.2
OPTIMO	SR	426889.8	10.5	16790	7167479308.1
OPTIMO	T(b)	12265.2	0.3	11680	143258069.8
APTO	G(a)	26883.0	0.7	15330	412116954.5
APTO	H(a)	216441.2	5.3	17885	3871050749.3
APTO	H(a) G(b)	38087.1	0.9	18980	722892488.3
APTO	H(b) G(a)	24522.7	0.6	18798	460977634.3

APTO	H(b) G(b)	60571.4	1.5	18980	1149644329.0
APTO	T(a)	6563.1	0.2	9308	61088938.4
APTO	T(a) G(b)	11458.2	0.3	8943	102470841.1
APTO	T(b) G(a)	27166.6	0.7	13140	356969178.2
APTO	T(b) G(b)	19268.5	0.5	12410	239121965.2
APTO	T(b) H(b)	5.5	0.0	10220	55910.9
APTO	T(b) H(b) G(b)	29.9	0.0	16790	502631.8
MARGINAL	H(a) G(a)	5783.2	0.1	19345	111876288.7
MARGINAL	T(a) G(a)	21467.3	0.5	8030	172382146.3
MARGINAL	T(b) H(b) G(a)	318.8	0.0	16790	5352560.2
EXCLUYENTE		2749152.4	67.9	0	0.0
TOTAL		4047731.5	100	268459	

Zonificación: Agroecológica productiva chañar

Región: Valparaíso

Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	25769.2	1.6	17155	442070053.9
OPTIMO	SR	63195.0	4.0	16790	1061043481.5
OPTIMO	T(b)	3958.2	0.2	11680	46232036.8
APTO	G(a)	1538.2	0.1	15330	23580090.0
APTO	T(a)	2686.2	0.2	9308	25003458.2
APTO	T(a) G(b)	6131.2	0.4	8943	54831159.7
APTO	T(b) G(a)	3241.6	0.2	13140	42594323.6
APTO	T(b) G(b)	4803.4	0.3	12410	59609672.7
MARGINAL	T(a) G(a)	9848.9	0.6	8030	79086751.4
EXCLUYENTE		1474858.4	92.4	0	0.0
TOTAL		1596030.2	100	112786	

APÉNDICE 7: Superficie estimada para la zonificación agroecológica para la especie madi (*Madia sativa* Mol.)

Zonificación:		Agroecológica productiva madi			
Región:		Atacama			
Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/año]
APTO	H(a)	31197.5	0.4	5355	167062703.8
APTO	H(a) G(b)	162563.5	2.2	5220	848581605.5
APTO	T(b) H(a)	5.8	0.0	4185	24329.5
APTO	T(b) H(b) G(b)	672.2	0.0	2790	1875475.1
MARGINAL	H(a) G(a)	231757.8	3.1	5220	1209775897.2
MARGINAL	T(a) H(a) G(a)	497.2	0.0	2070	1029291.9
MARGINAL	T(a) H(a) G(b)	580.1	0.0	2025	1174747.0
MARGINAL	T(b) H(a) G(a)	193605.9	2.6	3060	592434081.6
MARGINAL	T(b) H(a) G(b)	231543.8	3.1	3105	718943504.5
MARGINAL	T(b) H(b) G(a)	2937.4	0.0	2610	7666577.1
EXCLUYENTE		6700301.4	88.7	0	0.0
TOTAL		7555662.7	100.0	35640	

Zonificación:		Agroecológica productiva madi			
Región:		Coquimbo			
Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/año]
OPTIMO	H(b)	173196.8	4.3	4590	794973443.1
OPTIMO	T(b) H(b)	12549.1	0.3	3330	41788461.0
APTO	H(a)	13792.2	0.3	5355	73857187.6
APTO	H(a) G(b)	55820.1	1.4	5220	291381062.2
APTO	H(b) G(a)	230047.7	5.7	4320	993806035.4
APTO	H(b) G(b)	162631.5	4.0	4320	702568190.9
APTO	T(a) G(b)	23.7	0.0	2700	64083.3
APTO	T(a) H(b)	96.3	0.0	1800	173360.9
APTO	T(b) G(a)	38.6	0.0	2610	100741.3
APTO	T(b) G(b)	15.1	0.0	2790	42258.5
APTO	T(b) H(a)	14.5	0.0	4185	60508.9
APTO	T(b) H(b) G(b)	144514.9	3.6	2790	403196581.1
MARGINAL	H(a) G(a)	129089.2	3.2	5220	673845862.3
MARGINAL	T(a) G(a)	362.9	0.0	2610	947139.9
MARGINAL	T(a) H(b) G(a)	11856.4	0.3	2250	26677009.8
MARGINAL	T(a) H(b) G(b)	8353.6	0.2	2250	18795662.4

MARGINAL	T(b) H(a) G(a)	12874.4	0.3	3060	39395678.6
MARGINAL	T(b) H(a) G(b)	6412.3	0.2	3105	19910052.4
MARGINAL	T(b) H(b) G(a)	297090.2	7.3	2610	775405501.7
EXCLUYENTE		2789162.0	68.9	0	0.0
TOTAL		4047941.7	100.0	65115	

Zonificación: Agroecológica productiva madi

Región: Valparaíso

Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	231.8	0.0	4050	938777.3
OPTIMO	H(b)	340166.5	21.3	4590	1561364007.3
OPTIMO	SR	10.2	0.0	3960	40422.2
OPTIMO	T(b)	5980.5	0.4	3060	18300192.0
OPTIMO	T(b) H(b)	4216.8	0.3	3330	14041824.9
APTO	G(a)	669.4	0.0	3960	2650707.7
APTO	H(b) G(a)	56577.7	3.5	4320	244415566.7
APTO	H(b) G(b)	193982.4	12.2	4320	838003937.1
APTO	T(a)	987.6	0.1	2700	2666425.9
APTO	T(a) G(b)	11557.0	0.7	2700	31203930.2
APTO	T(a) H(b)	93.9	0.0	1800	169001.8
APTO	T(b) G(a)	33779.9	2.1	2610	88165639.8
APTO	T(b) G(b)	11614.7	0.7	2790	32404952.8
APTO	T(b) H(b) G(b)	11000.4	0.7	2790	30691135.1
MARGINAL	T(a) G(a)	38230.1	2.4	2610	99780682.7
MARGINAL	T(a) H(b) G(a)	1220.1	0.1	2250	2745266.4
MARGINAL	T(a) H(b) G(b)	480.3	0.0	2250	1080774.8
MARGINAL	T(b) H(b) G(a)	16179.2	1.0	2610	42227664.2
EXCLUYENTE		869106.1	54.5	0	0.0
TOTAL		1596084.5	100.0	56700	

Zonificación: Agroecológica productiva madi

Región: Metropolitana

Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	1891.3	0.1	4050	7659660.0
OPTIMO	H(b)	244018.9	15.9	4590	1120046933.2
OPTIMO	SR	1233.1	0.1	3960	4883041.2
OPTIMO	T(b)	11171.4	0.7	3060	34184355.9

OPTIMO	T(b) H(b)	3903.6	0.3	3330	12999076.0
APTO	G(a)	2131.6	0.1	3960	8441117.3
APTO	H(b) G(a)	24455.9	1.6	4320	105649572.1
APTO	H(b) G(b)	76139.8	5.0	4320	328924035.6
APTO	T(a)	4744.2	0.3	2700	12809302.1
APTO	T(a) G(b)	22273.1	1.5	2700	60137382.7
APTO	T(a) H(b)	16.9	0.0	1800	30471.2
APTO	T(b) G(a)	10968.6	0.7	2610	28627943.2
APTO	T(b) G(b)	9820.3	0.6	2790	27398563.4
APTO	T(b) H(b) G(b)	2421.9	0.2	2790	6757060.2
MARGINAL	T(a) G(a)	87512.7	5.7	2610	228408270.4
MARGINAL	T(a) H(b) G(a)	558.5	0.0	2250	1256605.5
MARGINAL	T(a) H(b) G(b)	255.1	0.0	2250	573943.8
MARGINAL	T(b) H(b) G(a)	1413.8	0.1	2610	3689927.6
EXCLUYENTE		1025955.0	67.0	0	0.0
TOTAL		1530885.7	100.0	56700	

Zonificación: Agroecológica productiva madi

Región: O'Higgins

Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	56614.0	3.5	4050	229286572.2
OPTIMO	H(b)	88951.2	5.4	4590	408286089.9
OPTIMO	SR	171544.6	10.5	3960	679316472.1
OPTIMO	T(b)	46026.7	2.8	3060	140841564.5
OPTIMO	T(b) H(b)	510.1	0.0	3330	1698593.2
APTO	G(a)	17428.0	1.1	3960	69014729.2
APTO	H(b) G(a)	12661.5	0.8	4320	54697578.7
APTO	H(b) G(b)	76710.7	4.7	4320	331390256.0
APTO	T(a)	52198.8	3.2	2700	140936768.0
APTO	T(a) G(b)	79384.5	4.9	2700	214338024.4
APTO	T(b) G(a)	9708.6	0.6	2610	25339566.5
APTO	T(b) G(b)	36175.8	2.2	2790	100930573.7
APTO	T(b) H(b) G(b)	1682.4	0.1	2790	4693785.6
MARGINAL	T(a) G(a)	164803.2	10.1	2610	430136401.9
MARGINAL	T(b) H(b) G(a)	68.8	0.0	2610	179526.2
EXCLUYENTE		820530.2	50.2	0	0.0
TOTAL		1634999.0	100.0	50400	

Zonificación:		Agroecológica productiva madi			
Región:		Maule			
Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	308002.7	10.2	4050	1247411047.5
OPTIMO	H(b)	2243.0	0.1	4590	10295498.2
OPTIMO	SR	321125.7	10.6	3960	1271657627.9
OPTIMO	T(b)	36261.1	1.2	3060	110958905.4
APTO	G(a)	49309.6	1.6	3960	195266078.4
APTO	H(b) G(a)	654.5	0.0	4320	2827449.8
APTO	H(b) G(b)	4477.4	0.1	4320	19342177.7
APTO	T(a)	241707.9	8.0	2700	652611270.7
APTO	T(a) G(b)	152459.6	5.0	2700	411640868.1
APTO	T(b) G(a)	10898.2	0.4	2610	28444339.7
APTO	T(b) G(b)	37636.0	1.2	2790	105004463.8
MARGINAL	T(a) G(a)	72679.1	2.4	2610	189692421.4
EXCLUYENTE		1789331.6	59.1	0	0.0
TOTAL		3026786.3	100.0	41670	

Zonificación:		Agroecológica productiva madi			
Región:		Biobío			
Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	264339.6	7.1	4050	1070575518.3
OPTIMO	SR	196934.6	5.3	3960	779861194.1
OPTIMO	T(b)	30040.0	0.8	3060	91922426.1
APTO	G(a)	34196.7	0.9	3960	135418972.0
APTO	T(a)	27823.8	0.8	2700	75124139.1
APTO	T(a) G(b)	17366.0	0.5	2700	46888308.7
APTO	T(b) G(a)	5687.2	0.2	2610	14843672.5
APTO	T(b) G(b)	36776.5	1.0	2790	102606454.7
MARGINAL	T(a) G(a)	3015.9	0.1	2610	7871506.5
EXCLUYENTE		3090226.3	83.4	0	0.0
TOTAL		3706406.7	100.0	28440	

Zonificación:		Agroecológica productiva madi			
Región:		Araucanía			
Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]

OPTIMO	G(b)	153436.9	4.8	4050	621419362.5
OPTIMO	SR	307638.5	9.7	3960	1218248576.8
OPTIMO	T(b)	44319.9	1.4	3060	135618909.4
APTO	G(a)	34095.7	1.1	3960	135019033.5
APTO	T(a)	25969.9	0.8	2700	70118785.8
APTO	T(a) G(b)	5798.8	0.2	2700	15656650.3
APTO	T(b) G(a)	3979.3	0.1	2610	10386079.0
APTO	T(b) G(b)	9392.3	0.3	2790	26204651.7
MARGINAL	T(a) G(a)	1505.2	0.0	2610	3928590.6
EXCLUYENTE		2595216.1	81.6	0	0.0
TOTAL		3181352.8	100.0	28440	

Zonificación: Agroecológica productiva madi

Región: Los Ríos

Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	230873.8	12.6	4050	935038822.4
OPTIMO	SR	144650.4	7.9	3960	572815738.7
OPTIMO	T(b)	3905.5	0.2	3060	11950936.7
APTO	G(a)	28434.5	1.5	3960	112600454.7
APTO	T(a)	3845.9	0.2	2700	10384047.5
APTO	T(a) G(b)	3042.7	0.2	2700	8215182.1
APTO	T(b) G(a)	182.8	0.0	2610	477169.2
APTO	T(b) G(b)	1461.2	0.1	2790	4076629.2
MARGINAL	T(a) G(a)	287.9	0.0	2610	751404.2
EXCLUYENTE		1420511.1	77.3	0	0.0
TOTAL		1837195.8	100.0	28440	

Zonificación: Agroecológica productiva madi

Región: Los Lagos

Aptitud	Restricción	Área [ha]	Área [%]	Producción anual [kg ms/ha año]	Producción anual [kg ms/ año]
OPTIMO	G(b)	89340.7	1.9	4050	361829816.5
OPTIMO	SR	24066.6	0.5	3960	95303827.7
OPTIMO	T(b)	2488.2	0.1	3060	7613931.3
APTO	G(a)	13177.2	0.3	3960	52181561.7
APTO	T(a)	3717.6	0.1	2700	10037545.8
APTO	T(a) G(b)	8522.3	0.2	2700	23010079.7
APTO	T(b) G(a)	760.7	0.0	2610	1985401.6

APTO	T(b) G(b)	4887.3	0.1	2790	13635605.6
MARGINAL	T(a) G(a)	716.6	0.0	2610	1870317.1
EXCLUYENTE		4670781.1	96.9	0	0.0
TOTAL		4818458.2	100.0	28440	

ANEXOS

ANEXO 1: Reseña de la metodología empleada en el desarrollo de las variables bioclimáticas de Chile.

La generación de las variables bioclimáticas forma parte de la elaboración del Atlas Bioclimático de Chile por parte del laboratorio de bioenergía y biotecnología ambiental de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

La elaboración de las variables meteorológicas se trabajó mediante los datos de las estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), además de una cartografía topográfica digital (NASA). Aplicando un criterio estándar para el análisis de la calidad de la información se analizaron series de tiempo de 15 años para la variable temperatura y de 20 años para la variable precipitación. Mediante un test de secuencias se determinó que estaciones contaban con datos homogéneos, es decir, datos ininterrumpidos durante la serie de tiempo establecida, en caso contrario la serie se denominó heterogénea. Para la elaboración de los trazados se utilizaron una serie de materiales enfatizando los datos de las estaciones meteorológicas y pluviométricas en ambos niveles de consistencia, cartografía de vegetación, geoformas, modelo digital de terreno, hipsometría, cuerpos de agua y red fluvial, entre otros. El trazado fue realizado bajo el asesoramiento del Ingeniero agrónomo Juan Manuel Uribe considerando la influencias de factores externos como son la latitud, longitud, altitud, exposición, sombra de lluvias, singularidades topográficas, cercanía a masas de agua, zonas de drenaje del aire e información vegetacional. Con las isoclinas generadas para cada variable meteorológica el siguiente paso consistió en la extracción de una red de puntos críticos los cuales denotaran las singularidades geográficas del país con la cual levantar la información climática mediante procesos de interpolación a una escala 1:250.000. El interpolador utilizado se denomina "Natural Neighbor" implementado en el software ArcGIS, se caracteriza por construir superficies de distribución de manera simple y rápida minimizando los errores, se expresa como el método más adecuado para cuando los valores a interpolar se encuentran distribuidos de forma desigual. Natural Neighbor o interpolador de proximidad natural o de cercanía trabaja generando ponderaciones promediadas, de esta manera genera una triangulación de Delauney a partir de locaciones mediadas y selecciona los nodos más cercanos para crear polígonos o escudos convexos alrededor de la locaciones que los conforman. Luego, pondera sus valores en base a un área proporcionada.

Las variables bioclimáticas derivadas de las meteorológicas se confeccionaron por medio de la aplicación de distintos modelos específicos, ninguna de ellas fue utilizada en el desarrollo de esta memoria por lo que su metodología no se adjunta.