

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL MEDIANTE
TELEDETECCIÓN SATELITAL Y SU RELACIÓN CON LA COMPOSICIÓN
FLORÍSTICA Y ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN EN UNA CUENCA ÁRIDA
DE LA REGIÓN DE COQUIMBO**

JAVIERA FERNANDA ULLOA PINO

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL MEDIANTE
TELEDETECCIÓN SATELITAL Y SU RELACIÓN CON LA COMPOSICIÓN
FLORÍSTICA Y ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN EN UNA CUENCA ÁRIDA
DE LA REGIÓN DE COQUIMBO**

**ESTIMATION OF ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION USING SATELLITE
REMOTE SENSING AND ITS RELATION WITH FLORISTIC COMPOSITION
AND VEGETATION STRUCTURE IN AN ARID WATERSHED OF THE
COQUIMBO REGION**

JAVIERA FERNANDA ULLOA PINO

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL MEDIANTE
TELEDETECCIÓN SATELITAL Y SU RELACIÓN CON LA COMPOSICIÓN
FLORÍSTICA Y ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN EN UNA CUENCA ÁRIDA
DE LA REGIÓN DE COQUIMBO**

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

JAVIERA FERNANDA ULLOA PINO

Profesores Guías	Calificaciones
Sr. Mauricio Galleguillos T. Ingeniero Agrónomo, M.S. Dr.	7,0
Sr. Jorge Pérez Q. Ingeniero Agrónomo, M.S. Ph.D.	7,0
Profesores Evaluadores	
Sr. Andrés de la Fuente D. Ingeniero Agrónomo	7,0
Sr. Rodrigo Fuster G. Ingeniero Agrónomo, M.S. Dr.	6,8

Santiago, Chile

2014

“Invertir en conocimientos produce siempre los mejores beneficios”
Benjamin Franklin

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecer a mis padres y padrinos, por su apoyo y contención incondicional durante todas las etapas de mi vida.

A mis profesores guías, Mauricio Galleguillos y Jorge Pérez, por haberme dado la posibilidad de realizar la presente Memoria de Título y profundizar mis conocimientos en el área de investigación. Por la confianza depositada en mí, sus consejos, disposición cada vez que fue necesario y, por sobretodo, impulsarme en mi crecimiento personal.

A mis compañeros del Laboratorio de Ecología de Ecosistemas (LECS), Ariel, Paola e Iván, que con su alegría, constantes consejos y palabras de aliento generaron un grato ambiente de trabajo.

A mis compañeros y amigos de la generación 2007, por permitir que mi paso por la Universidad fuera una experiencia inolvidable.

Por último y no menos importante, a David Messutto, quien nunca dudo de mis capacidades y siempre tuvo las palabras y gestos adecuados para hacerme sonreír y lograr salir adelante.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivo general	5
1.2. Objetivos específicos.....	5
2. MATERIALES Y MÉTODOS	6
2.1. Lugar de estudio	6
2.2. Materiales.....	7
2.2.1. Datos espaciales.....	7
2.2.2. Datos meteorológicos	8
2.2.3. Software	10
2.3. Metodología	10
2.3.1. Pre-procesamiento de imágenes satelitales	11
2.3.2. Estimación de la evapotranspiración real.....	12
2.3.3. Selección de sitios de muestreo.....	14
2.3.4. Caracterización florística y estructural de la vegetación	17
2.3.5. Relación entre la ET_r y variables vegetacionales y topográficas	20
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
3.1. Estimación de la evapotranspiración real	22
3.1.1. Fracción evaporativa.....	22
3.1.2. Radiación neta	23
3.1.3. Coeficiente de la razón entre la radiación neta diaria e instantánea.....	25
3.1.4. Evapotranspiración real	26
3.2. Caracterización florística y estructural de la vegetación	27
3.2.1. Composición florística	27
3.2.2. Atributos estructurales de especies de leñosas y suculentas	29
3.2.3. Variables vegetacionales por tipo biológico	29

3.3. Relación entre la ET_r y variables vegetacionales y topográficas	32
3.3.1. ET_r y atributos estructurales de especies leñosas y suculentas	32
3.3.2. ET_r y variables vegetacionales	32
3.3.3. ET_r y variables topográficas	35
3.3.4. ET_r y variables vegetacionales y topográficas.....	37
4. CONCLUSIONES	38
5. BIBLIOGRAFÍA	39
6. ANEXOS	47
7. APÉNDICES.....	51

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Datos disponibles de radiación solar global (R_g) y temperatura del aire (T_a) por estación meteorológica presente o cercana al área de estudio.	9
Cuadro 2. Descripción de tipos biológicos.....	18
Cuadro 3. Especies en categorías de conservación de la flora leñosa y suculenta identificada en la cuenca de Las Cardas.	29
Cuadro 4. Parámetros estadísticos de variables vegetacionales por tipo biológico.....	30
Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Spearman (r_s) significativos entre la ET_r y atributos estructurales de especies leñosas.	32
Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Spearman (r_s) significativos entre la ET_r y variables vegetacionales.	33
Cuadro 7. Mejor modelo de regresión de ET_r usando variables vegetacionales.	34
Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson (r) o Spearman (r_s) significativos entre la ET_r y variables topográficas.	35
Cuadro 9. Mejor modelo de regresión de ET_r usando variables topográficas.....	36
Cuadro 10. Mejor modelo de regresión de ET_r usando variables vegetacionales y topográficas.....	37
Cuadro 11. Características de los subsistemas del sensor ASTER.....	49
Cuadro 12. Características de las bandas espectrales del sensor ETM+.....	49
Cuadro 13. Caracterización de los sitios de muestreo de acuerdo a variables espaciales....	57
Cuadro 14. Listado florístico de leñosas y suculentas identificadas en la cuenca de Las Cardas.	61
Cuadro 15. Atributos de especies leñosas y suculentas identificadas en la cuenca de Las Cardas.	63
Cuadro 16. Parámetros estadísticos de los atributos estructurales de especies leñosas y suculentas.....	65
Cuadro 17. Matriz presencia (1) / ausencia (0) de especies leñosas y suculentas en cada sitio de muestreo.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización y cartografía de elevaciones del área de estudio.....	6
Figura 2. Localización de las estaciones meteorológicas presentes o cercanas al área de estudio.....	9
Figura 3. Esquema de estimación de la evapotranspiración real a partir del algoritmo S-SEBI.	13
Figura 4. Distribución espacial del índice de vegetación SAVI (23/09/03) (a) e índice de geofoma “Multiresolution Valley Bottom Flatness” (MrVBF) (b).	15
Figura 5. Distribución espacial de los sitios de muestreo sobre escena ASTER (23/09/03) en composición falso color convencional.....	16
Figura 6. Método de la transecta lineal aplicado en la cuenca de Las Cardas.	17
Figura 7. Diagrama de dispersión entre la temperatura de superficie [K] y el albedo de superficie [-], utilizado para estimar la fracción evaporativa [-]. Puntos azules y rojos representan los píxeles seleccionados para generar las rectas T_{LET} y T_H , respectivamente.	23
Figura 8. Regresión lineal entre la radiación solar global instantánea a las 11:00 horas registrada por la estación Las Cardas y el Explorador Solar.	24
Figura 9. Regresión lineal entre las temperaturas del aire a las 11:00 horas de la estación Recoleta, según método De Wit <i>et al.</i> (1978) (a) y método Wilkerson <i>et al.</i> (1983) (b), y las registradas por el sistema “Bowen-ratio”.....	24
Figura 10. Distribución espacial de la radiación neta [$W m^{-2}$].....	25
Figura 11. Relación entre el C_{di} y el día del año a las 11:00 horas.....	26
Figura 12. Distribución espacial de la evapotranspiración real a escala diaria [$mm d^{-1}$]. ...	27
Figura 13. Número de especies vegetales por familia.	28
Figura 14. Regresión lineal entre el fitovolumen de la transecta lineal de 5 [m] de longitud y el de la parcela de 25 [m^2]: fitovolumen herbáceo (a) y fitovolumen leñoso (b).	31
Figura 15. Comparación entre la ET_r predicha por el modelo de regresión usando variables vegetacionales y la ET_r estimada por el algoritmo S-SEBI.....	35

Figura 16. Comparación entre la ET_r predicha por el modelo de regresión usando variables topográficas y la ET_r estimada por el algoritmo S-SEBI.....	36
Figura 17. Comparación entre la ET_r predicha por el modelo de regresión usando variables vegetacionales y topográficas, y la ET_r estimada por el algoritmo S-SEBI.	37
Figura 18. Precipitación anual de la estación meteorológica Las Cardas entre los años 1977 y 2012.	47
Figura 19. Precipitación mensual de la estación meteorológica Las Cardas en los años 2003 (a), 2011 (b) y 2012 (c).....	48
Figura 20. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) diaria registrada en el mes de septiembre en la estación meteorológica Las Cardas en los años 2012 (a) y 2013 (b). ..	50
Figura 21. Relación entre la temperatura de superficie y la reflectancia de superficie.	51
Figura 22. Radiación solar global (R_g) [$W\ m^{-2}$] en días despejados y nublados.	54
Figura 23. Diagrama de dispersión entre los índices de vegetación SAVI [-] del 23 de septiembre de 2003 y 29 de septiembre de 2011 en cada sitio de muestreo.....	58
Figura 24. Distribución espacial de la temperatura de superficie [K].	59
Figura 25. Distribución espacial del albedo de superficie [-].....	59
Figura 26. Distribución espacial de la emisividad superficial [-].....	60
Figura 27. Riqueza de especies por tipos biológicos en cada sitio de muestreo.	69
Figura 28. Riqueza de géneros y familias en cada sitio de muestreo.	70
Figura 29. Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') de especies leñosas y suculentas en cada sitio de muestreo.	70
Figura 30. Cobertura por tipos biológicos en cada sitio de muestreo.....	71
Figura 31. Cobertura total en cada sitio de muestreo.....	71
Figura 32. Altura media del follaje (\pm D.E.) de los tipos biológicos: herbáceo (a), arbustivo (b), arbóreo (c) y suculento (d), en cada sitio de muestreo.....	72
Figura 33. Fitovolumen total ajustado en cada sitio de muestreo.....	73

RESUMEN

Conocer las relaciones entre la estructura y el funcionamiento de los sistemas naturales es indispensable para lograr comprenderlos íntegramente y, por consiguiente, establecer estrategias efectivas de manejo y conservación de la naturaleza. El desarrollo de nuevas técnicas de modelamiento basado en teledetección satelital, ha logrado cuantificar variables funcionales del ecosistema como la evapotranspiración real (ET_r). La ET_r refleja la disponibilidad hídrica y energética del medio y, en zonas áridas y semiáridas, representa el mayor flujo hídrico. En este estudio, el propósito fue estimar la evapotranspiración real, mediante técnicas de teledetección satelital, y explorar su relación con la composición florística y estructura de la vegetación en una cuenca árida de la Región de Coquimbo. Para estimar la ET_r se calibró el algoritmo S-SEBI, utilizando una imagen satelital del sensor ASTER y datos meteorológicos. Los atributos florísticos y estructurales de la vegetación se obtuvieron de 30 sitios de muestreo que abarcaron todo el rango de variabilidad de ET_r y, adicionalmente, se evaluaron variables topográficas, derivadas de un Modelo Digital de Elevación (DEM). Se realizaron análisis estadísticos de correlación simple (r de Pearson; r_s de Spearman) para explorar la relación entre la ET_r y las variables vegetacionales y topográficas, y luego, se generaron modelos de regresión multivariados que permitieron predecir la ET_r . Los resultados muestran que la ET_r oscila entre 0,01 y 5,05 [mm d^{-1}], con una media de 2,26 [mm d^{-1}] y desviación estándar de 0,90 [mm d^{-1}], y se encuentra correlacionada significativamente con numerosas variables vegetacionales y topográficas, entre las que destacan: la riqueza de especies arbóreas ($r_s = 0,59$; $p < 0,001$), altura media de herbáceas ($r_s = 0,58$; $p < 0,001$), altitud ($r = 0,60$; $p < 0,001$), exposición normalizada al norte ($r_s = -0,49$; $p < 0,01$) y exposición normalizada al este ($r_s = -0,42$; $p < 0,05$). El modelo predictivo generado con las variables antes mencionadas explica un 88% de la variabilidad de la ET_r (RMSE = 0,33 [mm d^{-1}]). Se concluye que la ET_r obtenida mediante técnicas de teledetección satelital es un aporte para comprender el funcionamiento de la vegetación nativa de ambientes áridos y semiáridos.

Palabras clave: Ecohidrología, funcionamiento ecosistémico, balance energético superficial, biodiversidad, fitovolumen.

ABSTRACT

Knowing the relationship between the structure and functioning of natural system is key to fully understand and, therefore, establish effective strategies for management and conservation of nature. The development of new modeling techniques based on satellite remote sensing, has allowed to quantify functional ecosystem variables such as actual evapotranspiration (ET_r). The ET_r represents the availability of water and energy of the environment and is the largest water flow in arid and semi-arid zones. In this study, the objectives were to estimate ET_r using satellite remote sensing techniques and to explore its relation with the floristic composition and vegetation structure in an arid watershed of the Coquimbo Region. To estimate the ET_r the S-SEBI algorithm was calibrated, by the use of one ASTER scene and meteorological data. The floristic and structural attributes of vegetation were collected from 30 sampling sites that cover the entire range of variability of ET_r and, in addition, topographical features were assessed, derived from a Digital Elevation Model (DEM). Statistical analyses were performed considering simple correlations (Pearson r ; Spearman r_s) to explore the relationship between the ET_r and the vegetation and topographical variables. Multivariate linear regression models were generated to predict ET_r . The results show that the ET_r varies between 0.01 and 5.05 [mm d^{-1}], with mean \pm SD 2.26 ± 0.90 [mm d^{-1}], and is significantly correlated with several vegetation and topographical variables, among which are: the tree species richness ($r_s = 0.59$; $p < 0.001$), average height of herbaceous plants ($r_s = 0.58$; $p < 0.001$), altitude ($r = 0.60$; $p < 0.001$), northing aspect ($r_s = -0.49$; $p < 0.01$) and easting aspect ($r_s = -0.42$; $p < 0.05$). The predictive model generated with the variables previously mentioned explains 88% of the variability of ET_r (RMSE = 0.33 [mm d^{-1}]). We conclude that the ET_r obtained by remote sensing techniques is a contribution to understand the functioning of native vegetation of arid and semi-arid environments.

Key words: Ecohydrology, ecosystem functioning, surface energy balance, biodiversity, phytovolume.

1. INTRODUCCIÓN

Conocer las relaciones entre la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas es indispensable para lograr comprenderlos íntegramente y, por consiguiente, establecer estrategias efectivas de manejo y conservación de la naturaleza. Investigaciones al respecto (Aguiar *et al.*, 1996; Cardinale *et al.*, 2011; Maestre *et al.*, 2012), han demostrado vínculos causales entre atributos estructurales (composición de especies y fisonomía de la vegetación) y funcionales del ecosistema (productividad primaria y ciclo de nutrientes), advirtiendo que un cambio en la estructura de éstos podría afectar su funcionalidad y, en consecuencia, la cantidad y calidad de los servicios que proporcionan a los seres humanos (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Durante los últimos años, la teledetección o percepción remota se ha convertido en una herramienta de gran utilidad en estudios ecológicos, particularmente a escala ecosistémica, puesto que mejora la percepción de la heterogeneidad del paisaje al proveer información cuantitativa, espacialmente continua y regular en el tiempo, de la superficie terrestre (Cabello y Paruelo, 2008; Escribano *et al.*, 2008). En este ámbito, el uso más tradicional de la teledetección suele estar asociado a la caracterización estructural del paisaje, basado en clasificaciones digitales e interpretación visual de imágenes (Paruelo, 2008). Sin embargo, la percepción remota permite además describir aspectos funcionales de los sistemas naturales, cuantificando flujos de materia y energía entre la comunidad biótica y la atmósfera como la productividad primaria, pérdida de nutrientes, balance de energía o evapotranspiración real (Cabello *et al.*, 2012).

Según Sánchez (2008), la evapotranspiración real, actual o efectiva (ET_r), es un término combinado que comprende a los conceptos de evaporación y transpiración, y se utiliza para describir al proceso total de transferencia de agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. La evaporación constituye la cantidad de agua que, por el proceso físico de vaporización, se traspa a la atmósfera proveniente del suelo, los cuerpos de agua y la vegetación; mientras que la transpiración corresponde a la pérdida de vapor de agua desde las plantas hacia la atmósfera, dependiente básicamente de mecanismos fisiológicos entre los que destaca la regulación estomática.

De acuerdo a la definición anterior, la ET_r resulta ser un componente importante del ciclo hidrológico y del balance de energía superficial al permitir la transferencia de agua entre la superficie terrestre y la atmósfera (Chapin III *et al.*, 2002), reflejando la disponibilidad hídrica y energética del ecosistema (Arias y Poveda, 2007). Por ello, su cuantificación se hace necesaria en contextos tan diferentes como la producción vegetal, la planificación y gestión de recursos hídricos o en estudios ambientales o ecológicos (Sánchez, 2001).

Su estimación, mediante técnicas de teledetección, se realiza a partir de modelos basados en el balance energético superficial que usan, específicamente la temperatura de superficie, como principal variable explicativa del funcionamiento del sistema suelo-planta-atmósfera

(Norman *et al.*, 1995; Bastiaanssen *et al.*, 1998; Su, 2002; Sánchez *et al.*, 2008). Uno de los modelos existentes es el propuesto por Roerink *et al.* (2000), “Simplified Surface Energy Balance Index” (S-SEBI), caracterizado por ser un modelo simple, fácil de implementar y encontrarse validado en recientes investigaciones en diversos ecosistemas naturales (Verstraeten *et al.*, 2005; Sobrino *et al.*, 2007; Boronina y Ramillien, 2008) y cultivados (Gómez *et al.*, 2005; Galleguillos *et al.*, 2011a; Olivera-Guerra *et al.*, 2014), obteniendo resultados con un grado de precisión superior al 70%, adecuado para estudios hidrológicos (Kalma *et al.*, 2008). Pese a sus prometedores resultados, son escasas las investigaciones que vinculen la ET_r , estimada por medio de técnicas de teledetección, con factores bióticos a escala del ecosistema como la composición de la vegetación, sino más bien se han enfocado en el perfeccionamiento de este tipo de modelos.

Los ambientes áridos y semiáridos abarcan un tercio de la superficie terrestre (Li, 2011) y sustentan al 38% de la población humana (Reynolds *et al.*, 2007). Son catalogados como altamente vulnerables a la desertificación y cambios climáticos, encontrándose entre los ecosistemas más frágiles del mundo, condición que se está acentuando debido a las sequías periódicas y explotación excesiva de los escasos recursos (provisión de agua, leña, forraje para la ganadería caprina, entre otros) (Malagnoux *et al.*, 2007). No obstante su extensión e importancia social y ecológica, estos ambientes han sido poco estudiados, especialmente en lo que refiere a las relaciones entre estructura y funcionamiento ecosistémico (Maestre *et al.*, 2012). En estas zonas, donde el recurso hídrico es el factor limitante de la actividad biológica terrestre, y por tanto, determinante del flujo energético del sistema (Noy-Meir, 1973), conocer la ET_r es fundamental para comprender su funcionamiento, ya que en este tipo de ambientes representa el mayor flujo hídrico al devolver a la atmósfera cerca del 90% de la precipitación anual (Guo, 2005).

La vegetación en estas regiones presenta una alta variabilidad espacial, mostrando con frecuencia una estructura en parches, con una biomasa relativamente alta, pero dispersa en una matriz de suelo casi desnudo (Aguilar y Sala, 1999). La vegetación es un indicador del estado actual de los sistemas naturales, ya que de acuerdo a sus cambios en composición florística y estructura permite expresar las variaciones naturales y antrópicas del medio (Etienne y Prado, 1982). La composición florística hace referencia a las especies vegetales observadas en un lugar determinado, y la estructura hace alusión al patrón espacial de distribución de las especies, tanto de forma horizontal como vertical (Verschuyl *et al.*, 2008).

En situaciones de escasez hídrica, Mitchell *et al.* (2009) sostienen que la transpiración puede dominar la ET_r si la vegetación es capaz de adquirir agua por debajo de las profundidades de la superficie de evaporación, puesto que esta última es baja y la energía para realizar el proceso de evapotranspiración es alta. La tasa de pérdida de agua dependerá de las condiciones atmosféricas y de las especies vegetales, esto último considerando que cada planta posee requerimientos hídricos distintos (Sánchez, 2001; Smith y Smith, 2001). Por ende, se espera que la evapotranspiración real estimada mediante técnicas de teledetección satelital en zonas con limitaciones hídricas, pueda ser explicada en gran parte por la composición florística y estructura de la vegetación.

Bajo este contexto, el propósito de la presente investigación es estimar la evapotranspiración real mediante técnicas de modelamiento basado en teledetección satelital y, posteriormente, explorar su relación con la composición florística y estructura de la vegetación en una cuenca árida de la Región de Coquimbo. Esta región se identifica por poseer la mayor riqueza específica de plantas vasculares de las regiones de Chile, con altos niveles de endemismo (Squeo *et al.* 2012), encontrándose entre los 34 “hotspot” mundiales de biodiversidad reconocidos por Mittermeier *et al.* (2004). A pesar de ello, producto de actividades antrópicas como el pastoreo y la extracción de leña, se encuentra altamente degradada, por lo que es imprescindible profundizar el conocimiento acerca de estos ecosistemas, con el fin de generar medidas efectivas de manejo y conservación de sus recursos naturales.

1.1. Objetivo general

Estimar la evapotranspiración real mediante modelamiento basado en teledetección satelital, y relacionarla con la composición florística y estructura de la vegetación en una cuenca árida de la Región de Coquimbo.

1.2. Objetivos específicos

- Estimar la evapotranspiración real de la cuenca de Las Cardas, mediante el algoritmo S-SEBI.
- Explorar la relación entre la evapotranspiración real y la composición florística y estructura de la vegetación de la cuenca de Las Cardas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Lugar de estudio

El estudio se realizó en la cuenca hidrográfica que comprende a la localidad de Las Cardas, ubicada en la Provincia de Elqui, Región de Coquimbo ($30,24^{\circ}$ - $30,33^{\circ}$ S; $71,21^{\circ}$ - $71,32^{\circ}$ O), 45 [km] al sur de la ciudad de La Serena (Figura 1). Posee una superficie de 7.342 [ha], que incluye sectores planos, algunos con posibilidades de riego, y terrenos de alta pendiente de uso exclusivamente ganadero (mayoritariamente caprino) o vida silvestre (Universidad de Chile, 2012). La mayor extensión de la cuenca (alrededor del 70%) es propiedad de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, y corresponde a la Estación Experimental Las Cardas.

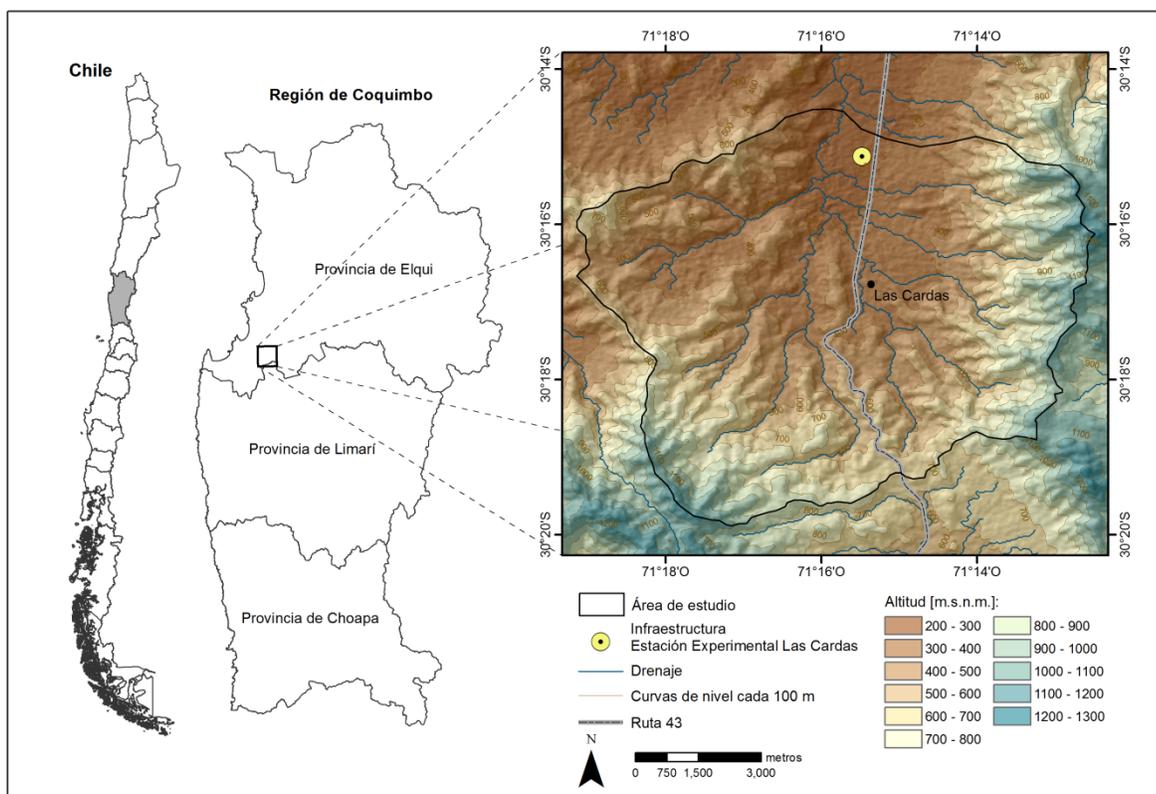


Figura 1. Localización y cartografía de elevaciones del área de estudio.

El clima es de estepa con nubosidad abundante (BSn), de acuerdo a la clasificación de Koeppen (1948), caracterizado por la influencia marina y presencia de abundante nubosidad matinal y nocturna, debido a su cercanía al Océano Pacífico (menos de 20 [km]). El registro histórico de precipitaciones de la estación meteorológica localizada en el sitio de estudio ($30,25^{\circ}$ S; $71,26^{\circ}$ O), indica que la precipitación media anual es de 139,24 [mm]

(Anexo I), concentrada entre los meses de junio y septiembre. La evapotranspiración potencial varía alrededor de 1.000 [mm año⁻¹], alcanzando durante la época estival un promedio del orden de 150 [mm mes⁻¹] e inferior a los 50 [mm mes⁻¹] en algunos meses de invierno (IREN, 1977). La temperatura media anual del aire oscila entre 11 y 19 [°C], siendo la máxima de 26 [°C] y la mínima de 8 [°C], ambas registradas durante los meses más extremos (Cepeda-Pizarro, 1993).

Según la clasificación vegetacional de Gajardo (1994), la cuenca de Las Cardas se encuentra dentro de la formación vegetal del Matorral Estepario Costero, correspondiente a una formación de arbustos bajos de hojas duras, que se distribuyen sobre las grandes terrazas costeras y en las laderas de los macizos montañosos cercanos al océano. En años lluviosos hay un gran desarrollo del estrato herbáceo primaveral, pero normalmente hay extensas áreas de suelo descubierto. La vegetación dominante corresponde al matorral ralo y bajo de las grandes unidades florísticas de *Gutierrezia resinosa* (Hook. & Arn.) S.F. Blake (pichanilla) y *Flourensia thurifera* DC. (incienso), en el que aparecen elementos arbóreos dispersos representados por *Acacia caven* (Molina) Molina (espino) y *Lithraea caustica* (Molina) Hook. & Arn. (litre), además de suculentas que predominan en exposición norte (Lailhacar y Aylwin, 1988).

El suelo corresponde a un Aridisol de origen coluvial-aluvial (Van Wambeke y Luzio, 1982; Lailhacar *et al.*, 1989) y, en general, su textura es franco-arenosa en los horizontes superficiales y areno-francosa en profundidad (Cepeda-Pizarro, 1993).

2.2. Materiales

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados se utilizaron los siguientes materiales:

2.2.1. Datos espaciales

La información espacial consta de una imagen satelital del sensor ASTER, dos imágenes satelitales Landsat-7 ETM+ y un modelo digital de elevación, que se detallan a continuación:

2.2.1.a. Imagen ASTER. Para estimar la evapotranspiración real y caracterizar el vigor vegetal de la cuenca de Las Cardas se utilizó una imagen satelital del sensor ASTER (“Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer”), a bordo del satélite Terra. El sensor fue desarrollado para obtener imágenes de alta resolución espectral y espacial, y capta información en tres regiones espectrales diferentes: visible e infrarrojo cercano (VNIR, “Visible and Near Infrared”), infrarrojo de onda corta (SWIR, “Short Wave Infrared”) e infrarrojo térmico (TIR, “Thermal Infrared”) (Abrams *et al.*, 2002).

Mayor detalle acerca de las características de cada subsistema puede revisarse en el Anexo II.

La información empleada corresponde a los productos oficiales ASTER, nivel L2B, de reflectancia superficial de las regiones espectrales del VNIR y SWIR, a una resolución espacial de 15 y 30 metros, respectivamente; y a la emisividad superficial y temperatura de superficie, ambas a una resolución espacial de 90 metros. Cabe señalar que estos productos ASTER conllevan correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas.

La imagen utilizada fue adquirida el 23 de septiembre de 2003, alrededor de las 11:00 horas (hora local), sin la presencia de cobertura nubosa, con el propósito de asegurar que la vegetación se encuentre en su máximo estado de crecimiento, dado que las precipitaciones en el sitio de estudio se concentran durante los meses de junio y septiembre. Data del año 2003, pues era la única escena disponible para ese período del año.

2.2.1.b. Imágenes Landsat-7 ETM+. Se emplearon dos imágenes satelitales del sensor ETM+ (“Enhanced Thematic Mapper Plus”), a bordo del satélite Landsat-7, con fechas de adquisición 23 de septiembre de 2003 y 29 de septiembre de 2011, a las 11:30 horas aproximadamente (hora local), para evaluar la estabilidad en el tiempo del estado de la vegetación, puesto que la ET_r se estimó para el año 2003 y la caracterización florística y estructural de la vegetación se realizó el año 2012. Se utilizó una escena del año 2011, ya que todas las imágenes disponibles que datan de septiembre del año 2012 presentan abundante nubosidad sobre el lugar de estudio.

Las escenas fueron descargadas del servidor “USGS Global Visualization Viewer” (GloVis)¹ con un nivel de procesamiento L1T, que corresponde a imágenes corregidas geoméricamente. Se usaron sólo las bandas espectrales 3 y 4, cuya resolución espacial es de 30 metros (ver Anexo II).

2.2.1.c. Modelo digital de elevación. Para incluir la componente topográfica se usó un modelo digital de elevación (DEM, “Digital Elevation Model”) a una resolución espacial de 30 metros, obtenido a través de la plataforma “ASTER Global Digital Elevation Model” (ASTER GDEM)².

2.2.2. Datos meteorológicos

Para estimar la ET_r se requieren datos meteorológicos de radiación solar global (R_g) y temperatura del aire (T_a) al momento de paso del satélite. Estos datos se obtuvieron recopilando información de estaciones meteorológicas presentes o cercanas al área

¹ <http://glovis.usgs.gov/>

² <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>

estudiada (Figura 2). Los datos disponibles de cada una de las estaciones de la Figura 2 se observan en el Cuadro 1.

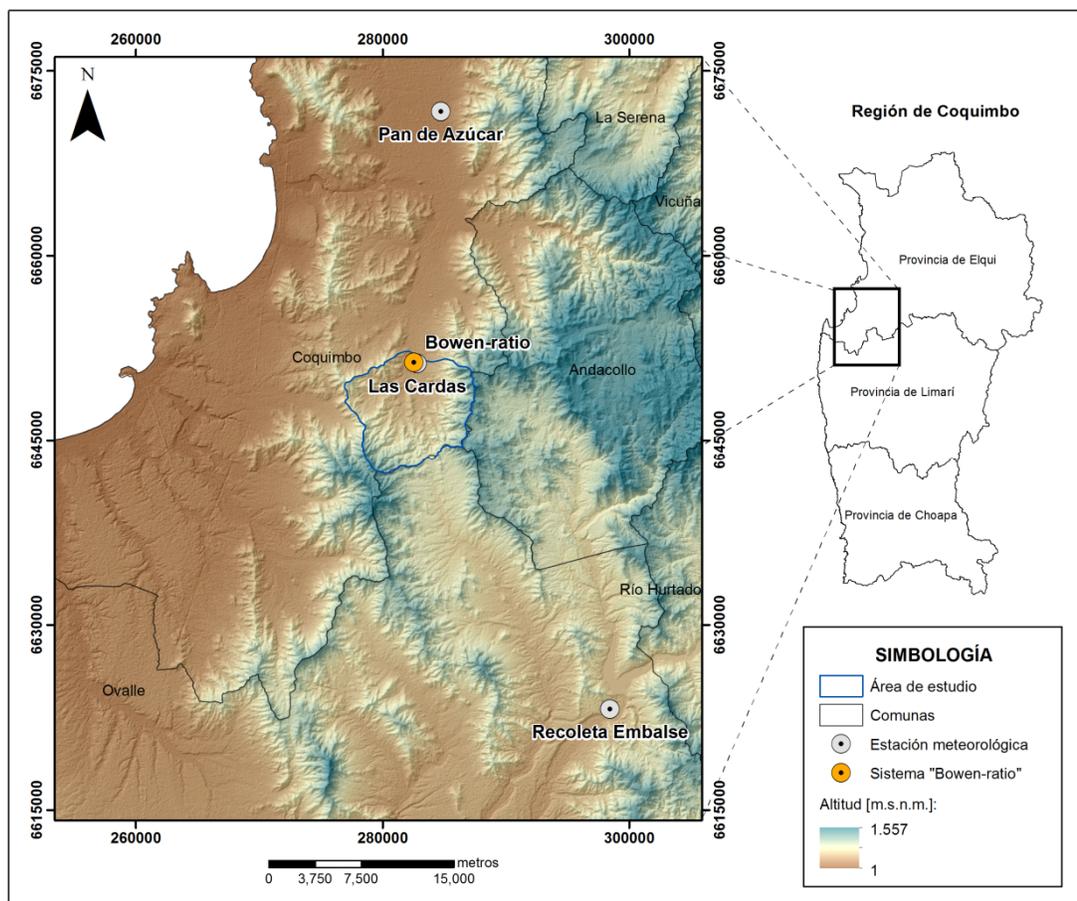


Figura 2. Localización de las estaciones meteorológicas presentes o cercanas al área de estudio.

Cuadro 1. Datos disponibles de radiación solar global (R_g) y temperatura del aire (T_a) por estación meteorológica presente o cercana al área de estudio.

Estación meteorológica	Administración	Datos disponibles		R_g	T_a
		Desde	Hasta		
Las Cardas ¹	CEZA	dic-09	abr-11	*	*
Las Cardas ²	CEAZA	jun-12	-	*	*
Pan de Azúcar [INIA] ²	CEAZA	feb-04	-	*	*
Recoleta Embalse ³	DGA	ene-00	dic-11		*
Bowen-ratio ⁴	CEZA	feb-08	dic-10		*

¹Datos instantáneos cada 15 minutos. ²Datos horarios (mínimo, promedio, máximo).

³Datos diarios (mínimo, promedio, máximo). ⁴Datos instantáneos cada 20 minutos.

Acorde a lo expuesto en el Cuadro 1, la estación meteorológica Las Cardas antes del año 2012 era administrada por el Centro de Estudios de Zonas Áridas (CEZA), perteneciente a

la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. Posteriormente, su administración se transfirió al Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), organismo que a su vez se encuentra a cargo de la estación meteorológica Pan de Azúcar. Actualmente, los datos de ambas estaciones están disponibles en la plataforma de la Red de estaciones meteorológicas CEAZA (CEAZA-Met)³. La información de la estación Recoleta fue solicitada por Ley de Transparencia a la Dirección General de Aguas (DGA), y los datos del sistema “Bowen-ratio” fueron suministrados por el CEZA. Cabe señalar que este último, estaba ubicado en matorral natural y proporcionó además información de radiación neta (R_n) para el mismo período señalado en el Cuadro 1.

Adicionalmente, se utilizaron datos modelados de radiación solar global (R_g) provenientes del Explorador del Recurso Solar en Chile⁴ (en adelante, Explorador Solar), desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, por encargo del Ministerio de Energía de Chile y “Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit” (GIZ). La información fue generada a partir de modelos atmosféricos y datos satelitales para el período comprendido entre los años 2003 y 2012, con una resolución espacial de 1 [km] y frecuencia de 30 minutos.

Con el fin de conocer las condiciones hidrológicas del área de estudio, se dispuso de un registro histórico de precipitaciones mensuales de la estación Las Cardas desde el año 1977 al 2012, suministrado por el CEZA. Estos registros pluviométricos anuales (1977-2012) y mensuales para los años de interés del presente estudio (2003, 2011 y 2012), se pueden apreciar en el Anexo I. A su vez, se contó con datos de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) de la estación Las Cardas, desde el año 2012 en adelante, disponibles en el sitio web del CEAZA-Met. La ET_0 publicada en la plataforma, fue estimada mediante la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006).

2.2.3. Software

Para procesar los datos espaciales se utilizaron los programas ENVI 4.3, Idrisi Taiga 16.03, SAGA GIS y ArcGIS 10.1. Para calibrar el modelo de estimación de la ET_r se usaron GNU Octave y R-project 3.0.2. Este último, empleado además para realizar los análisis estadísticos, en conjunto con Microsoft Office Excel.

2.3. Metodología

El procedimiento aplicado en la presente memoria se encuentra conformado por 5 actividades, que se describen a continuación:

³ <http://www.cezamet.cl/>

⁴ <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>

2.3.1. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

2.3.1.a. Imagen ASTER. A las bandas espectrales de las regiones del VNIR y SWIR se les aplicó un proceso de remuestreo denominado “upscaling”, a través de la media de todos los píxeles que estuvieran contenidos dentro de un píxel de 90 [m], para dejar como grilla de trabajo a las bandas espectrales de la región del TIR y obtener una imagen satelital con 14 bandas de 90 [m] de resolución espacial (ver Anexo II), además del producto oficial ASTER de temperatura superficial.

Wang *et al.* (2010) señalan que la temperatura superficial (T_s) presenta una relación inversa con la altitud, disminuyendo 0,65 [°C] cada 100 [m]. Por consiguiente, la T_s fue corregida topográficamente según:

$$T_s = T_0 + 0,0065(E_{DEM} - E_{ref}) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde,

- T_0 : Temperatura de superficie [°C]
- E_{DEM} : Altitud según DEM a una resolución espacial promediada a 90 [m]
- E_{ref} : Altitud de la estación meteorológica Las Cardas (288,11 [m.s.n.m.]⁵)

2.3.1.b. Imágenes Landsat-7 ETM+. Considerando el nivel de procesamiento L1T y data de adquisición de las imágenes satelitales Landsat-7 ETM+, se aplicaron correcciones radiométricas, del bandeo, topográficas y atmosféricas a cada escena.

Los niveles digitales (ND) registrados en las bandas espectrales 3 y 4 (ver Anexo II) fueron convertidos a radiancia espectral de acuerdo al procedimiento reportado por Chander *et al.* (2009). La corrección del bandeo se realizó acorde a lo señalado por Scaramuzza *et al.* (2004), utilizando el módulo “Landsat Gapfill” del programa ENVI 4.3 y empleando de base imágenes adquiridas el 6 de agosto de 2003 y 15 de octubre de 2011, alrededor de las 11:30 horas (hora local). Ambas escenas fueron seleccionadas por encontrarse sin nubosidad y cercanas a la fecha de captura de las “imágenes a corregir”⁶, se descargaron de la plataforma GloVis y fueron procesadas hasta el cálculo de radiancia espectral antes de ser usadas de base.

La corrección topográfica se formalizó mediante el método semiempírico propuesto por Teillet *et al.* (1982), conocido como “corrección C”. Se utilizó el DEM a una resolución espacial de 30 [m] para calcular la imagen de iluminación requerida para dicha corrección. La corrección atmosférica se efectuó aplicando el método de substracción del objeto oscuro (Chávez, 1988). En este caso, el objeto oscuro corresponde al valor mínimo relativo de radiancia espectral inferido del histograma de valores de cada banda espectral, de cada escena.

⁵ Este valor se obtuvo del DEM a una resolución espacial promediada a 90 [m].

⁶ Imágenes Landsat-7 ETM+ del 23 de septiembre de 2003 y 29 de septiembre de 2011.

Finalmente, se estimó la reflectividad aparente de la cubierta acorde a Chuvieco (2002). Los valores de irradiancia solar en el techo de la atmósfera necesarios para el cálculo fueron recogidos del artículo de Chander *et al.* (2009).

2.3.2. Estimación de la evapotranspiración real

Para estimar la evapotranspiración real (ET_r) se utilizó el modelo propuesto por Roerink *et al.* (2000), “Simplified Surface Energy Balance Index” (S-SEBI). Este modelo, basado en el balance de energía superficial, permite estimar los flujos energéticos de superficie instantáneos con técnicas de teledetección sobre una base píxel por píxel, y sólo puede utilizarse cuando las condiciones atmosféricas sobre el sitio de estudio son constantes, sin la presencia de nubes y con suficientes contrastes espaciales entre áreas húmedas y secas.

El balance de energía en la superficie terrestre puede ser expresado de forma simplificada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_n = G_0 + H + LET \quad \text{Ec. 2}$$

Donde,

- R_n : Radiación neta [$W\ m^{-2}$]
- G_0 : Flujo de calor del suelo [$W\ m^{-2}$]
- H : Flujo de calor sensible [$W\ m^{-2}$]
- LET : Flujo de calor latente [$W\ m^{-2}$]

De los procesos descritos en la Ecuación 2, sólo la R_n se obtiene directamente mediante técnicas de teledetección. G_0 es determinado por medio de una relación empírica entre la vegetación y características de la superficie; mientras que H y LET se calculan en conjunto a través de la fracción evaporativa, parámetro constitutivo del algoritmo S-SEBI.

La fracción evaporativa (A), se define como la razón entre el flujo de calor latente y la energía disponible según la Ecuación 3 (Roerink *et al.*, 2000) y, por ende, cuantifica la porción de la energía disponible usada en el proceso de evapotranspiración.

$$A = \frac{LET}{LET + H} = \frac{LET}{R_n - G_0} \quad \text{Ec. 3}$$

S-SEBI, adicionalmente permite obtener una aproximación de la distribución espacial de la ET_r a escala diaria [$mm\ d^{-1}$] (Gómez *et al.*, 2005; Sobrino *et al.*, 2007; Galleguillos *et al.*, 2011a; Olivera-Guerra *et al.*, 2014), extrapolando la R_n estimada al instante de paso del satélite a magnitudes diarias, y asumiendo durante el día A instantánea constante y G_0 despreciable. Acorde a lo señalado y reescribiendo la Ecuación 3, la ET_r fue estimada según:

$$ET_r = \frac{\lambda_d R_{nd}}{L} = \frac{\lambda_i C_{di} R_{ni}}{L} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde,

- λ : Fracción evaporativa [-]
- R_n : Radiación neta [W m^{-2}]
- C_{di} : Coeficiente de la razón entre la radiación neta diaria e instantánea [-]
- L : Calor latente de vaporización ($2,45 [\text{MJ kg}^{-1}]$)

Los subíndices d e i descritos en la Ecuación 4 para λ y R_n , se refieren a valores diarios e instantáneos, respectivamente. Mayor información acerca de los métodos aplicados para obtener las variables λ , R_n y C_{di} , puede revisarse en el Apéndice I.

Cabe señalar que S-SEBI sólo fue calibrado para las condiciones de la cuenca de Las Cardas, bajo el respaldo de recientes investigaciones que han demostrado la robustez de las estimaciones del algoritmo en diversos ecosistemas naturales (Verstraeten *et al.*, 2005; Sobrino *et al.*, 2007; Boronina y Ramillien, 2008) y cultivados (Gómez *et al.*, 2005; Galleguillos *et al.*, 2011b). Para calibrar el modelo, se utilizó la imagen ASTER adquirida el 23 de septiembre de 2003 alrededor de las 11:00 horas. Por lo tanto, la ET_r del área de estudio fue estimada para tal fecha.

A continuación, se presenta un esquema del procedimiento aplicado para estimar la evapotranspiración real mediante el algoritmo S-SEBI (Figura 3):

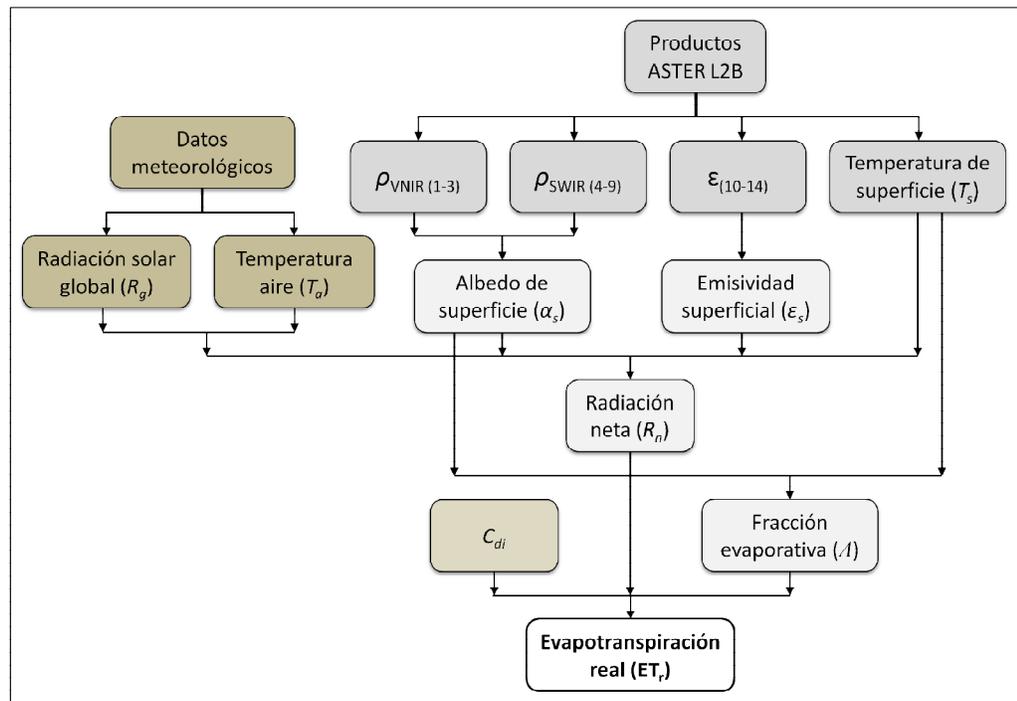


Figura 3. Esquema de estimación de la evapotranspiración real a partir del algoritmo S-SEBI.

2.3.3. Selección de sitios de muestreo

Estimada la ET_r se procedió a seleccionar los sitios de muestreo de composición florística y estructura de la vegetación. Para ello, y con el propósito de abarcar todo el rango de variabilidad de ET_r dentro del muestreo, se discretizó el espacio geográfico en unidades homogéneas mediante una clasificación no supervisada de máxima verosimilitud. Este método permite determinar clases espectrales presentes en la imagen satelital, asumiendo que los valores digitales de cada escena forman una serie de agrupaciones o conglomerados (“cluster”). Estos grupos equivalen a píxeles con un comportamiento espectral semejante y, por tanto, logran definir clases temáticas de interés (Chuvieco, 2002). Se emplearon 2 variables espaciales, además de la ET_r , para realizar dicha clasificación: el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI, “Soil-adjusted Vegetation Index”) y el índice topográfico de geoforma “Multiresolution Valley Bottom Flatness” (MrVBF) (Figura 4).

El índice de vegetación SAVI, propuesto por Huete (1988), se utilizó para incorporar la componente vegetacional dentro de la clasificación. En general, los índices de vegetación permiten discriminar masas vegetales de alta actividad fotosintética de otras cubiertas en fases fenológicas iniciales (Soria y Granados, 2005), producto de las propiedades reflectivas de la vegetación en las regiones espectrales del visible e infrarrojo cercano (Gilabert *et al.*, 1997; Vicente-Serrano *et al.*, 2005).

Se escogió el índice de vegetación SAVI por ser apropiado para regiones áridas y semiáridas, que tienen baja cobertura vegetal y, consecuentemente, alto porcentaje de reflectancia del suelo. Sus valores por píxel oscilan entre -1 y 1 [-]. A mayor valor del índice, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. Por el contrario, bajos valores significan una vegetación enferma, decreciendo hasta llegar a suelos descubiertos y cuerpos de agua (con valores negativos). Para estimar este índice, se utilizaron las bandas espectrales 2 y 3 de la imagen satelital ASTER (ver Anexo II), aplicando la siguiente ecuación:

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + L} (1 + L) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde,

- ρ_{NIR} : Banda de reflectancia superficial del infrarrojo cercano
- ρ_R : Banda de reflectancia superficial del visible, correspondiente al rojo
- L : Coeficiente de ajuste de la vegetación (0,5 [-] para densidades intermedias de vegetación)

La topografía del terreno, según Armesto y Martínez (1978) y Gallardo-Cruz *et al.* (2009), es indirectamente uno de los factores responsables de la variabilidad espacial de la vegetación, puesto que distribuye la radiación solar incidente, provocando variaciones superficiales tanto en la energía disponible, como en las condiciones del balance hídrico. Dada la influencia de la topografía en la estructura y funcionamiento del ecosistema, se

escogió el índice de geoforma MrVBF, reportado por Gallant y Dowling (2003), para incluir esta componente en la clasificación no supervisada.

MrVBF es un algoritmo iterativo que permite diferenciar las geoformas de valle de las zonas de laderas pronunciadas. Sus valores por píxel varían entre 0 y 3 [-], pudiendo sobrepasar este último valor, dependiendo de las diferencias topográficas de la superficie. Valores altos del índice indican la presencia de valles definidos. De lo contrario, valores bajos corresponden a zonas no planas. La obtención del índice se realizó a través del programa SAGA GIS, utilizando el DEM a una resolución espacial de 30 [m]. Calculado el MrVBF fue generalizado a una resolución espacial de 90 [m], para hacerlo compatible con la grilla de la ET_r y del índice de vegetación SAVI.

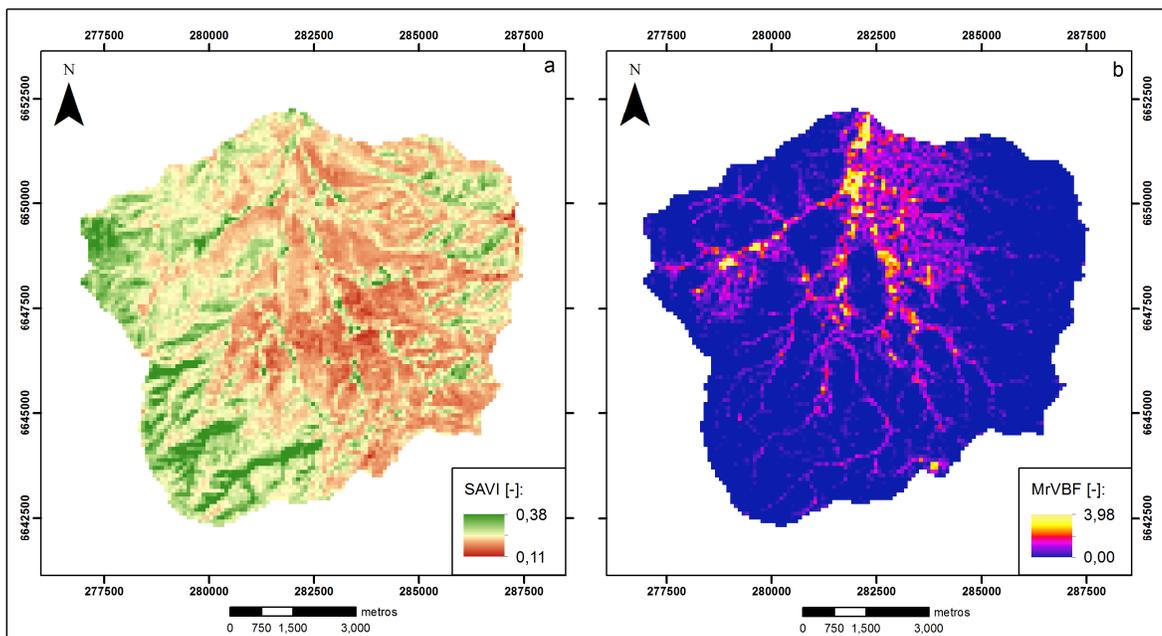


Figura 4. Distribución espacial del índice de vegetación SAVI (23/09/03) (a) e índice de geoforma “Multiresolution Valley Bottom Flatness” (MrVBF) (b).

Previo a la ejecución de la clasificación, se excluyeron todos los píxeles con pendientes abruptas (mayores a 45%) y/o con altitudes superiores a 800 [m.s.n.m.]. Lo anterior, aplicado a cada una de las 3 variables espaciales utilizadas, y con la finalidad de que el muestreo sea realizable en terreno. Filtradas las variables, fueron normalizadas mediante una función lineal, cuyo rango de variabilidad osciló entre 0 y 1.

La clasificación no supervisada se obtuvo mediante el módulo “Iso Cluster” del programa ArcGIS 10.1, definiendo 10 clases temáticas en total. Efectuada la clasificación, se eliminaron aquellos píxeles que estuvieron en agrupaciones espaciales menores o iguales a un número de 4 celdas, para asegurar que al momento de muestrear en terreno efectivamente se abarquen las zonas elegidas.

Se seleccionaron 30 sitios de muestreo, 3 sitios por clase, distribuidos de tal forma que éstos lograron representar toda la variabilidad espacial del área de estudio (Figura 5). Los puntos de muestreo fueron ubicados manualmente al centro del píxel que estaba al medio de la unidad homogénea escogida. Cada sitio fue caracterizado de acuerdo a las variables espaciales empleadas en la clasificación (ET_r , SAVI y MrVBF) y variables topográficas derivadas del DEM a una resolución espacial promediada a 90 [m] (altura, exposición y pendiente) (ver Apéndice II).

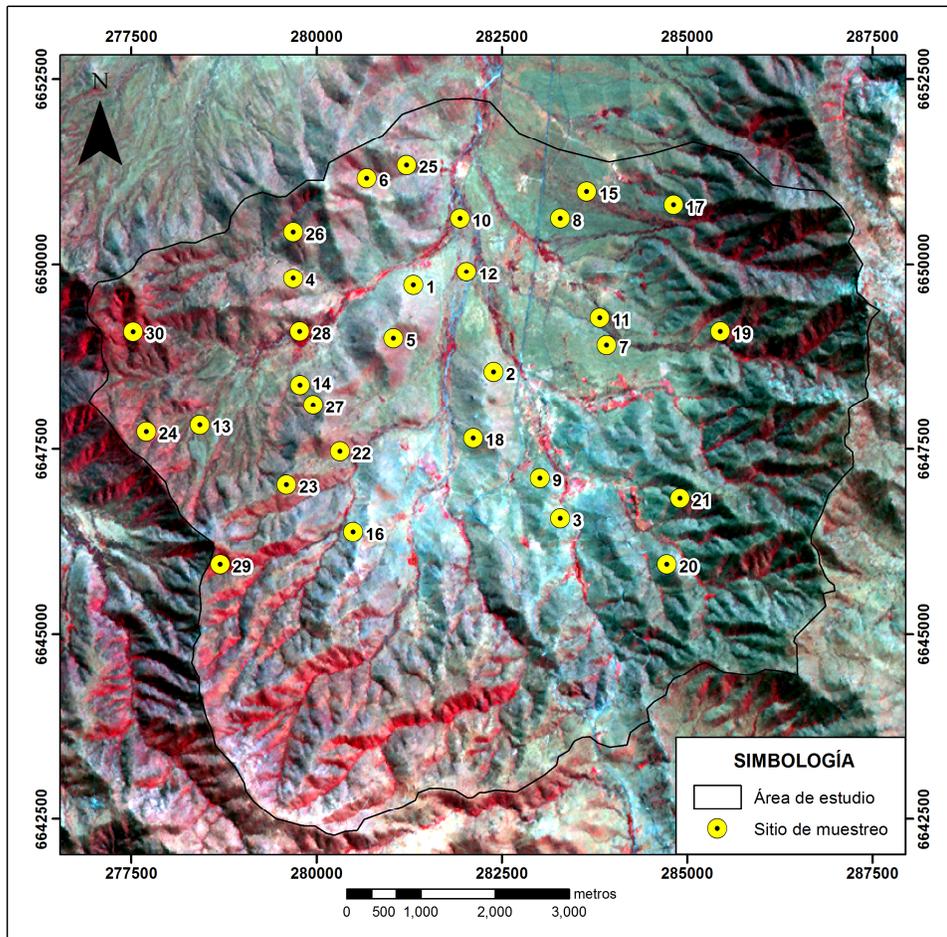


Figura 5. Distribución espacial de los sitios de muestreo sobre escena ASTER (23/09/03) en composición falso color convencional.

Adicionalmente, para evaluar la estabilidad en el tiempo del estado de la vegetación en los sitios escogidos, se realizó una comparación del vigor vegetal a través del índice de vegetación SAVI, utilizando las imágenes satelitales Landsat-7 ETM+ del 23 de septiembre de 2003 y 29 de septiembre de 2011 (ver Apéndice III). En este caso, para estimar el índice se usaron las bandas espectrales 3 y 4 de cada escena (ver Anexo II), aplicando la Ecuación 5.

2.3.4. Caracterización florística y estructural de la vegetación

Seleccionados los 30 sitios de muestreo se procedió a realizar la caracterización florística y estructural de la vegetación de la cuenca de Las Cardas, cuyo muestreo se efectuó entre el 24 de septiembre y 02 de octubre de 2012. Este período fue posterior a las precipitaciones de invierno (Anexo I), a modo de observar en terreno la vegetación en condiciones similares a la fecha de adquisición de la escena ASTER del año 2003. En esta época del año, las plantas muestran su mayor desarrollo, tanto vegetativo como florístico, registrando el máximo de actividad (Vicente-Serrano *et al.*, 2005).

El método de muestreo fue el de la transecta lineal o línea de intercepción, propuesto por Canfield (1941), diseñado principalmente para medir la composición y estructura de la vegetación herbácea y arbustiva, siendo su uso adecuado en ambientes áridos y semiáridos (Kent y Coker, 1998; Caratti, 2006). El método consiste en realizar observaciones sobre una o varias líneas extendidas a través de la vegetación (Figura 6). Por ende, los datos son suministrados por las distintas especies vegetales que interceptan la línea, ya sea por contacto o proyección (Coulloudon *et al.*, 1999).

En cada sitio de muestreo se realizó una transecta de 100 [m] de longitud con orientación noroeste-sureste (NO-SE), coincidente a una de las diagonales del píxel seleccionado. La dirección de la transecta se estableció con la ayuda de una brújula, donde el inicio fue fijado en la dirección NO (0 [m]) y el término en la dirección SE (100 [m]). La mitad de la misma (50 [m]), se hizo coincidir con el centro del píxel escogido.



Figura 6. Método de la transecta lineal aplicado en la cuenca de Las Cardas.

Mediante este procedimiento se obtuvo la cobertura y altura media del follaje de las especies vegetales más representativas de cada unidad de muestreo. La cobertura se estimó a partir de la longitud interceptada por la proyección perpendicular de las partes aéreas de cada individuo, expresado luego como porcentaje de la superficie total; mientras que la altura fue el promedio de la sección de la planta que estuvo interceptando la línea (Caratti, 2006). Con estos datos se describió, además, cada sitio en función de los diferentes tipos biológicos que lo componen: herbáceo, leñoso y suculento (Cuadro 2).

Cuadro 2. Descripción de tipos biológicos.

Tipo biológico	Descripción
Herbáceo	Comprende a especies de tejidos no lignificados, con tallos ricos en clorofila y fotosintéticos
Leñoso	Comprende a especies de tejidos lignificados o leñosos, agrupando árboles y arbustos
Suculento	Comprende a especies de las familias Bromeliaceae y Cactaceae

Fuente: Elaboración propia en base a Etienne y Prado (1982).

La discriminación entre especies arbóreas y arbustivas, ambas pertenecientes al tipo biológico leñoso, se realizó conforme a su hábito de crecimiento, según lo señalado por Zuloaga *et al.* (2008).

Bajo el mismo método de muestreo, se adquirió la cobertura de hojarasca, pedregosidad y suelo desnudo. La suma de estas dos últimas variables se denominó suelo descubierto.

Las especies leñosas y suculentas que interceptaron la transecta o se encontraron cercana a ella en un radio aproximado de 5 [m] fueron identificadas mediante guías florísticas. De no ser reconocidas directamente en terreno, se colectaron muestras de éstas en un cuaderno de campo y se les tomó registro fotográfico *in situ*, para posteriormente ser determinadas en laboratorio por especialistas⁷.

Con el total de especies leñosas y suculentas detectadas en la cuenca de Las Cardas, se realizó un listado florístico, cuya nomenclatura botánica se encuentra acorde al “Missouri Botanical Garden”⁸. Cada una de estas especies fue descrita de acuerdo a su origen geográfico (autóctona o alóctona) y endemismo a nivel nacional (endémica o no endémica), características obtenidas de Zuloaga *et al.* (2008). Además, se revisó su estado de conservación mediante el listado de especies clasificadas de flora silvestre, reconocido por la legislación chilena vigente.

Cabe señalar que las especies herbáceas no fueron incorporadas en términos florísticos dentro del muestreo, puesto que, a diferencia de especies leñosas y suculentas, presentan mayor dificultad de ser identificadas en terreno. No obstante, se describieron en conjunto como tipo biológico herbáceo.

Adicionalmente, se determinó la riqueza de cada sitio con las plantas leñosas y suculentas que interceptaron la transecta lineal. Si bien, se tuvo registro además de las especies cercanas a ella, éstas no fueron consideradas, con la finalidad de realizar un procedimiento riguroso de modo que los resultados fueran comparables. A su vez, se estimó la diversidad de especies vegetales a través del índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') (Shannon y

⁷ Rodomiro Osorio Barahona, Botánico de la Facultad de Ciencias de la Universidad de La Serena y, Luis Faúndez Yancas, Botánico de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

⁸ www.tropicos.org

Weaver, 1949), según la Ecuación 6, y utilizando los datos de cobertura específica de leñosas y suculentas. El índice es mínimo (igual a 0), cuando la muestra contiene sólo una especie, y máximo cuando todas las especies se encuentran representadas equitativamente.

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \quad \text{Ec. 6}$$

Donde,

- s : Número de especies
 p_i : Proporción de cobertura de la especie i -ésima en toda la muestra

Finalmente, con los datos de cobertura y altura media del follaje de los tipos biológicos leñoso y herbáceo presentes en cada unidad de muestreo, se estimó el fitovolumen [$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$] aplicando la Ecuación 7 (Gonzalez *et al.*, 2013; Mancilla-Leytón *et al.*, 2013).

$$\text{Fitovolumen} = \left(\frac{\text{Cobertura}}{100} \right) H_{\text{media}} \times 10.000 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde,

- Cobertura : Cobertura [%]
 H_{media} : Altura media del follaje [m]

Posteriormente, estos valores debieron ser ajustados, ya que el método de la línea de intercepción empleado para establecer la altura y cobertura del follaje no ha sido usado para calcular fitovolumen. Tradicionalmente, la estimación de esta variable estructural de la vegetación se realiza determinando el volumen aparente de la parte aérea de la planta conforme al cuerpo geométrico que más se le asemeja (cono, semiesfera, esfera, cubo o paralelepípedo, según corresponda), dentro de una superficie conocida (Blanco y Navarro, 2003).

Para ello, se efectuó una parcela de 5 x 5 metros al centro de cada transecta lineal. Por lo tanto, su inicio fue fijado a los 47,5 [m] y su término a los 52,5 [m]. Para comprender los 25 [m^2] del cuadrante, se consideró una distancia de 2,5 [m] hacia ambos lados de la transecta. Se registraron todas las plantas leñosas que se encontraron enraizadas dentro de la parcela, y se les midió a cada una los diámetros cruzados (menor y mayor) y altura media del follaje, para luego calcular el fitovolumen acorde al cuerpo geométrico que más se pareció a la forma de su follaje. Los datos específicos se sumaron, obteniendo el fitovolumen leñoso total. De forma paralela, se tomó registro de la cobertura y altura media del estrato herbáceo, y con ellos se determinó el fitovolumen de este tipo biológico.

Por otra parte, se usaron los datos de cobertura y altura media del follaje de las especies leñosas y herbáceas que interceptaron el tramo de 5 [m] de longitud de la transecta lineal que pasó dentro de la parcela de 25 [m^2]. Con éstos, se obtuvo el fitovolumen de ambos tipos biológicos de acuerdo a la Ecuación 7.

Con los datos antes mencionados, se generaron modelos de regresión lineal simple, con el objetivo de ajustar los datos del fitovolumen estimado por medio de la transecta de 100 [m] de longitud. La calidad de las estimaciones de estos modelos se evaluó a partir de los parámetros estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrado medio (RMSE, “Root Mean Square Error”) y error relativo cuadrado medio (RRMSE, “Relative Root Mean Square Error”).

El RMSE representa los errores cuadrados medios entre el valor estimado y el observado, acorde a la Ecuación 8; mientras que el RRMSE corresponde al RMSE relativo, es decir, expresado en porcentaje, y se determina dividiendo éste por la media de los valores observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{SCE}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde,

- SCE : Suma de cuadrados del error
- n : Número de observaciones
- \hat{y}_i : Valor estimado
- y_i : Valor observado

2.3.5. Relación entre la ET_r y variables vegetacionales y topográficas

Obtenida la información de composición florística y estructura de la vegetación del lugar de estudio, se procedió a determinar las variables que mejor se asociaron a la ET_r mediante un análisis de correlación simple. Este análisis permite identificar si dos variables se encuentran asociadas linealmente. La cuantificación de la intensidad de esta relación se efectúa a través del coeficiente de correlación. El valor de este estadístico oscila entre -1 y 1 [-]. Un valor próximo a -1 [-] indica una fuerte relación inversa; mientras que un valor cercano a 1 [-] evidencia una fuerte relación directa. Cuando el coeficiente es 0, la asociación es nula. Sin embargo, es de interés señalar que una alta correlación no implica causalidad entre variables (Zar, 2010).

Se evaluaron tanto las variables vegetacionales obtenidas en terreno, como las variables espaciales⁹ empleadas en la clasificación no supervisada (MrVBF y SAVI) y aquellas derivadas del DEM a una resolución espacial promediada a 90 [m] (altitud, pendiente y exposición). La exposición, fue normalizada al norte (N) y al este (E) conforme a las ecuaciones 9 y 10, respectivamente.

$$N = \cos\left(\text{Exposición} \times \frac{\pi}{180}\right) \quad \text{Ec. 9}$$

⁹ Datos extraídos de los píxeles donde se ubicaron los sitios de muestreo.

$$E = \sin\left(\text{Exposición} \times \frac{\pi}{180}\right) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde,

Exposición : Exposición [°]

Previo a realizar el análisis de correlación, se evaluó la normalidad de los datos de cada una de las variables mencionadas anteriormente, a través de la prueba estadística de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk, 1965).

Posteriormente, se estimaron los coeficientes de correlación propuestos por Pearson (1896) y Spearman (1904), dependiendo de la naturaleza de los datos. El coeficiente de correlación de Pearson (r) se usó cuando ambas variables fueron cuantitativas continuas y presentaron una distribución del tipo normal. De lo contrario, cuando una o ambas variables fueron cuantitativas discretas y/o no presentaron una distribución normal, se aplicó el coeficiente de correlación no paramétrico de los rangos de Spearman (r_s).

Por último, se generaron modelos de regresión lineal múltiple que permitieron predecir la ET_r y, por ende, conocer las variables que en conjunto la explican. La construcción de éstos, se efectuó mediante el método de árboles de clasificación de tipo regresión “Random Forest” (Breiman, 2001). Este procedimiento prioriza y escoge de entre todas las posibles variables predictoras, aquellas que mejor expliquen a la variable respuesta. En total se elaboraron 3 modelos predictivos de ET_r . El primero de ellos considerando sólo variables vegetacionales, el segundo sólo con variables topográficas, y finalmente uno con todas las variables.

La calidad de las estimaciones se evaluó a través de los parámetros estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), R^2 ajustado o corregido, error cuadrado medio (RMSE) y error relativo cuadrado medio (RRMSE). Adicionalmente, se testeó la normalidad de los residuos del modelo por medio de la prueba estadística de Shapiro-Wilk y la multicolinealidad utilizando el coeficiente VIF (Factores de Inflación de la Varianza), para verificar la independencia de los regresores (Fox, 2008).

Las pruebas estadísticas aplicadas durante el desarrollo de esta memoria se realizaron con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$), utilizando el “software” R-project.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Estimación de la evapotranspiración real

A continuación se presentan los resultados de la ET_r de la cuenca de Las Cardas del día 23 de septiembre de 2003, conforme al algoritmo S-SEBI, junto con las variables de entrada requeridas para su estimación, éstas son: fracción evaporativa, radiación neta y coeficiente de la razón entre la radiación neta diaria e instantánea.

3.1.1. Fracción evaporativa

Las variables requeridas para estimar la λ corresponden a la temperatura y albedo de superficie (ver Apéndice IV). La temperatura superficial (T_s) fluctúa entre 294,01 y 322,71 [K], cuya media es de 309,10 [K] y desviación estándar de 5,02 [K]. Los valores extremos de T_s (máximo y mínimo) evidencian una diferencia de 28,70 [K] entre áreas húmedas y secas. Esta diferencia es muy importante, siendo superior a la registrada en otros ecosistemas (Gómez *et al.*, 2005; Galleguillos *et al.*, 2011a) y similar a los valores registrados para la zona del secano costero de la Región del Maule (Olivera-Guerra *et al.*, 2014). Estos contrastes superficiales identificados en la cuenca de Las Cardas, permitieron la aplicación del algoritmo S-SEBI.

Por otro lado, el albedo superficial (α_s) oscila entre 0,06 y 0,18 [-], con un promedio de 0,13 [-] y desviación estándar de 0,02 [-]. Estos valores bajos de α_s indican alta humedad en el suelo, situación esperable producto de la época del año en que fue adquirida la imagen satelital.

La relación entre T_s y α_s , que permitió determinar la λ (Figura 7), presenta una relación directa y de tipo lineal, puesto que los patrones espaciales de ambas variables son relativamente similares (ver Apéndice IV). Las rectas en color rojo y azul de la Figura 7, representan los flujos máximos de calor sensible y latente, respectivamente, y sus ecuaciones se exponen dentro del mismo gráfico de dispersión. De acuerdo a la figura antes señalada, la superficie del sitio de estudio se encuentra prácticamente controlada por un régimen evaporativo, indicando que existe disponibilidad de humedad en el suelo y que el total de energía disponible se está utilizando para realizar el proceso de evapotranspiración.

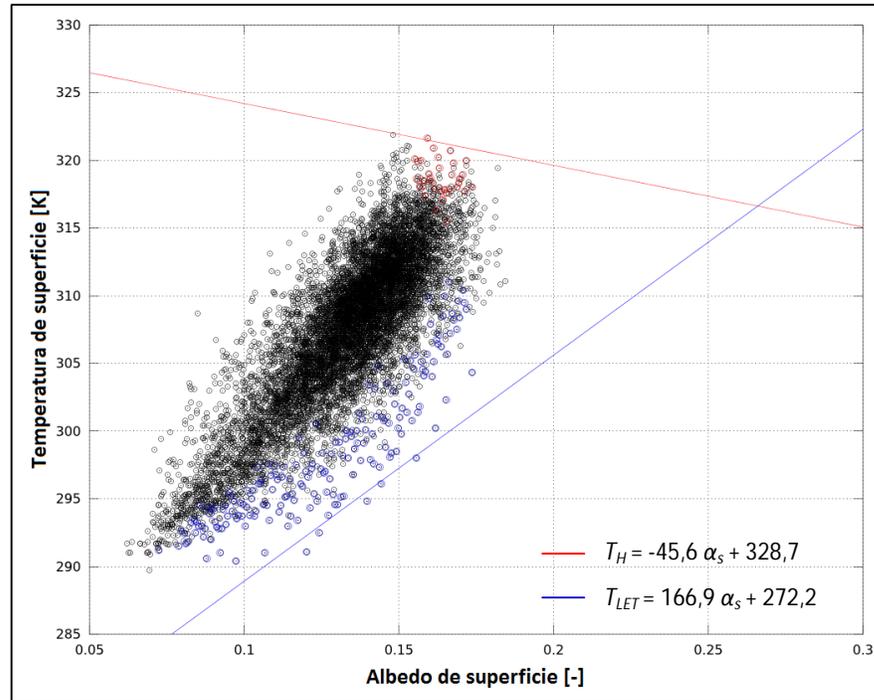


Figura 7. Diagrama de dispersión entre la temperatura de superficie [K] y el albedo de superficie [-], utilizado para estimar la fracción evaporativa [-]. Puntos azules y rojos representan los píxeles seleccionados para generar las rectas T_{LET} y T_H , respectivamente.

3.1.2. Radiación neta

El cálculo de R_n precisó, además de las variables T_s y α_s expuestas en la sección anterior, de la emisividad de superficie, y de los datos meteorológicos de radiación solar global y temperatura del aire.

La emisividad superficial (ϵ_s) varía entre 0,93 y 0,99 [-], con una media de 0,96 [-] y desviación estándar de 0,01 [-], y su distribución en el espacio se puede observar en el Apéndice IV.

Para estimar la radiación solar global (R_g) se efectuó una regresión lineal entre los datos de R_g a las 11:00 horas de los días sin nubosidad de la estación Las Cardas y del Explorador Solar. Se detectaron en total 64 días despejados para el período comprendido desde junio a diciembre de 2012. Estos resultados se exponen en la Figura 8, donde se observa que los datos de R_g modelados a las 11:00 horas por el Explorador Solar presentan un error medio cuadrado mínimo de 3,3%, equivalente a 26,07 [W m⁻²], y son explicados totalmente por la regresión, puesto que el coeficiente de determinación (R^2) es aproximadamente igual a 1 ($p < 0,001$). Al ajustar mediante el modelo de regresión lineal el valor del Explorador Solar para el día 23 de septiembre de 2003 a las 11:00 horas (823,60 [W m⁻²]), se obtiene un valor de 796,50 [W m⁻²] para la estación Las Cardas.

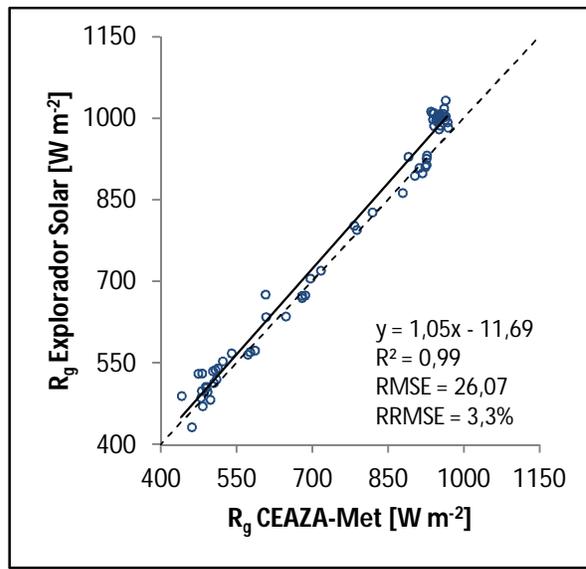


Figura 8. Regresión lineal entre la radiación solar global instantánea a las 11:00 horas registrada por la estación Las Cardas y el Explorador Solar.

La temperatura del aire (T_a) al instante de paso del satélite del lugar de estudio fue estimada mediante regresiones lineales entre la temperatura del aire a las 11:00 horas de la estación Recoleta, modelada según los métodos propuestos por De Wit *et al.* (1978) y Wilkerson *et al.* (1983), y los datos de T_a a las 11:00 horas del sistema “Bowen-ratio”, de los días sin cobertura nubosa en ambas localidades simultáneamente. Se identificaron en total 61 días despejados para el período comprendido desde febrero de 2008 a diciembre de 2010. Estos resultados se muestran en la Figura 9.

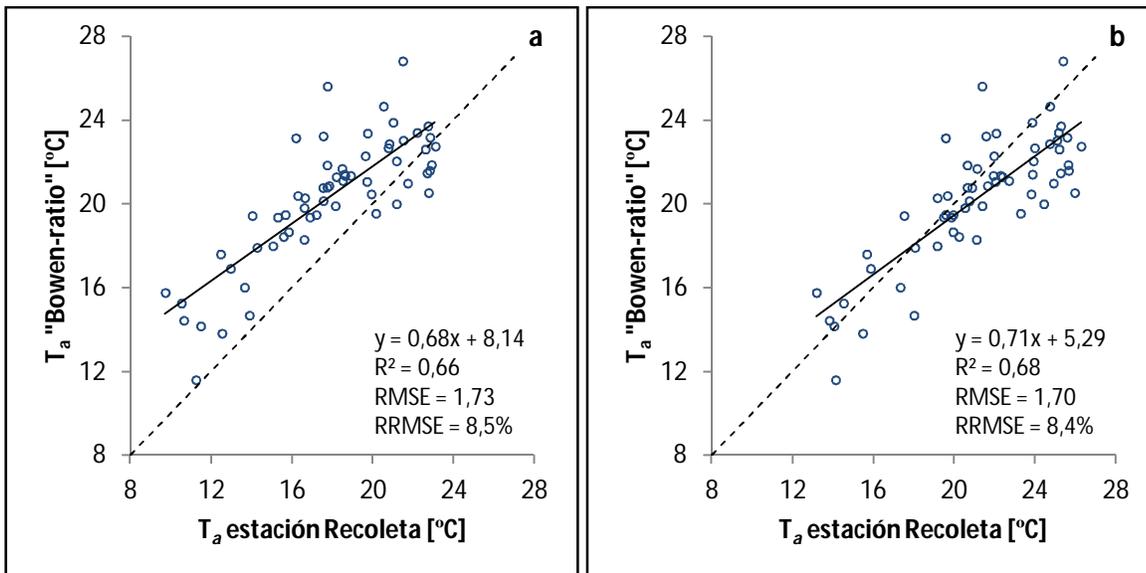


Figura 9. Regresión lineal entre las temperaturas del aire a las 11:00 horas de la estación Recoleta, según método De Wit *et al.* (1978) (a) y método Wilkerson *et al.* (1983) (b), y las registradas por el sistema “Bowen-ratio”.

Como se puede apreciar en la Figura 9, la regresión lineal con las temperaturas modeladas de la estación Recoleta a las 11:00 horas por el método propuesto por Wilkerson *et al.* (1983) (Figura 9.b), presenta resultados ligeramente más ajustados ($R^2 = 0,68$; $p < 0,001$) que la regresión aplicando el método reportado por De Wit *et al.* (1978) (Figura 9.a) ($R^2 = 0,66$; $p < 0,001$). Al ajustar al modelo de regresión lineal de la Figura 9.b, el valor modelado de T_a por el método de Wilkerson *et al.* (1983) a las 11:00 horas del día 23 de septiembre de 2003 de la estación Recoleta (16,25 [°C]), se obtiene un valor de 16,79 [°C] para el área de estudio.

Con las variables precedentemente expuestas, se estimó la radiación neta al instante de paso del satélite, cuyos valores fluctúan entre 319,92 y 572,24 [W m^{-2}], con una media de 432,93 [W m^{-2}] y desviación estándar de 45,50 [W m^{-2}] (Figura 10).

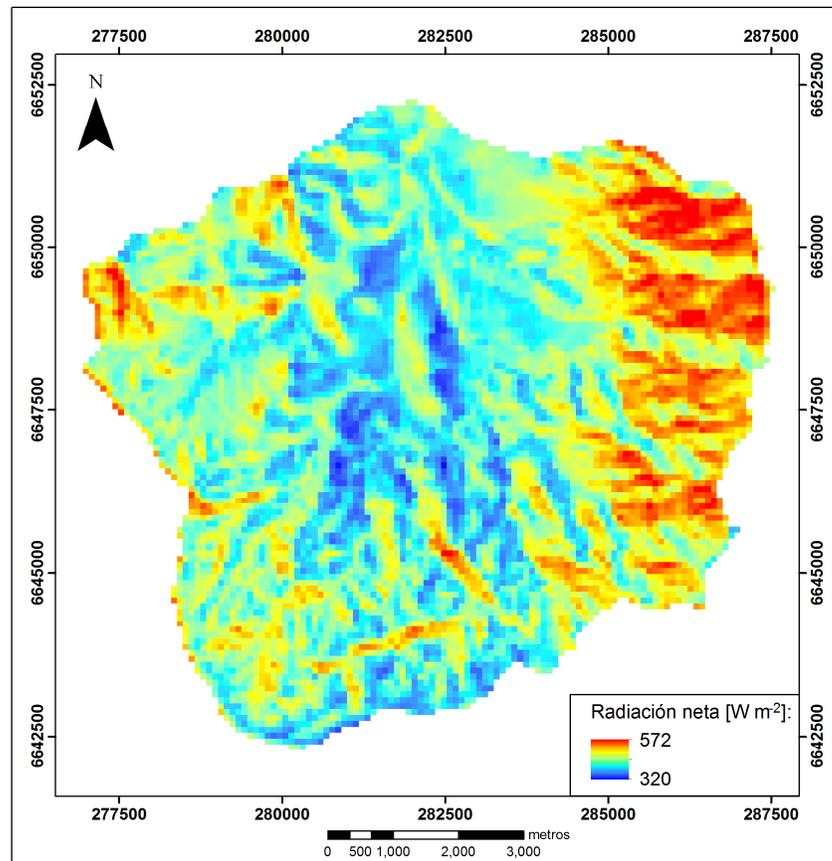


Figura 10. Distribución espacial de la radiación neta [W m^{-2}].

3.1.3. Coeficiente de la razón entre la radiación neta diaria e instantánea

La curva polinómica de segundo orden del coeficiente C_{di} a las 11:00 horas de todos los días del año del sitio en estudio se exhibe en la Figura 11. La curva fue elaborada a partir de datos de R_n , horarios y diarios, de 70 días despejados identificados en la cuenca de Las

Cardas durante el período comprendido entre los años 2008 y 2010. Para el día del año 266, correspondiente al 23 de septiembre de 2003, el C_{di} es 0,275 [-].

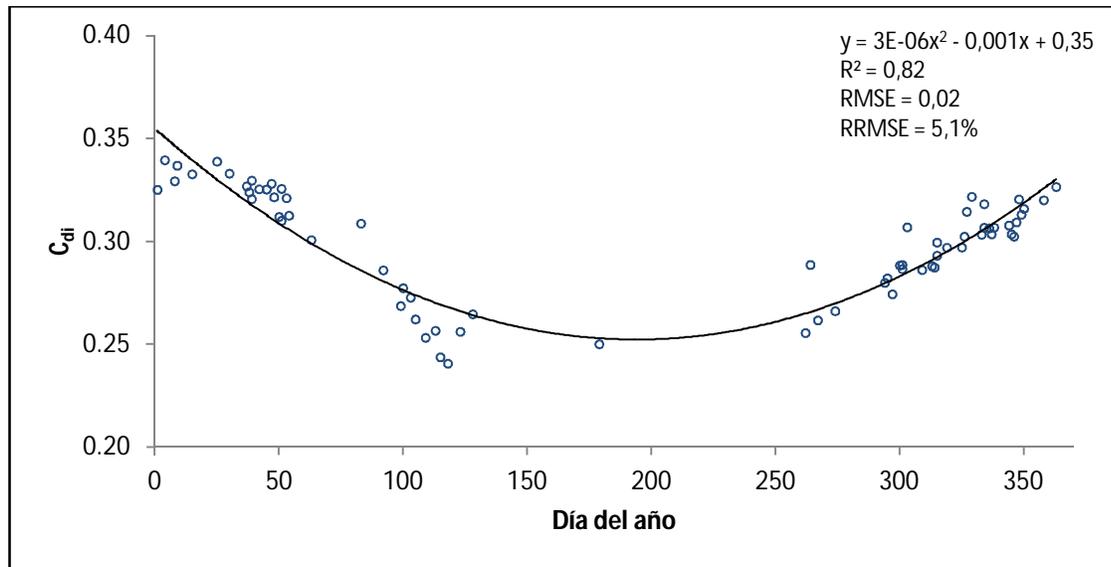


Figura 11. Relación entre el C_{di} y el día del año a las 11:00 horas.

3.1.4. Evapotranspiración real

La evapotranspiración real de la cuenca de Las Cardas del día 23 de septiembre de 2003 oscila entre 0,01 y 5,05 [mm d^{-1}], con un promedio de 2,26 [mm d^{-1}] y desviación estándar de 0,90 [mm d^{-1}] (Figura 12). Al observar la distribución espacial de la ET_r es posible distinguir, a grandes rasgos, patrones espaciales en sus valores extremos. Los menores valores se encuentran en la parte de menor elevación de la cuenca y corresponden a zonas con escasa cobertura vegetal; mientras que los mayores valores se localizan en el sector de mayor altitud de la cuenca, concentrándose en el área este del sitio de estudio. Mayor información acerca de la ET_r puede revisarse más adelante dentro del manuscrito en la sección 3.3: Relación entre la ET_r y variables vegetacionales y topográficas.

Por otra parte, la estación meteorológica presente en el lugar de estudio indica que la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) un día despejado de finales del mes de septiembre varía entre 3,20 y 4,50 [mm d^{-1}], con una media de 3,96 [mm d^{-1}] (ver Anexo III). Al comparar estos registros con el valor obtenido de ET_r en la ubicación de la estación meteorológica (1,31 [mm d^{-1}]), se evidencia que existe un importante déficit hídrico en este sector de la cuenca de alrededor 2,65 [mm d^{-1}] durante esta época del año.

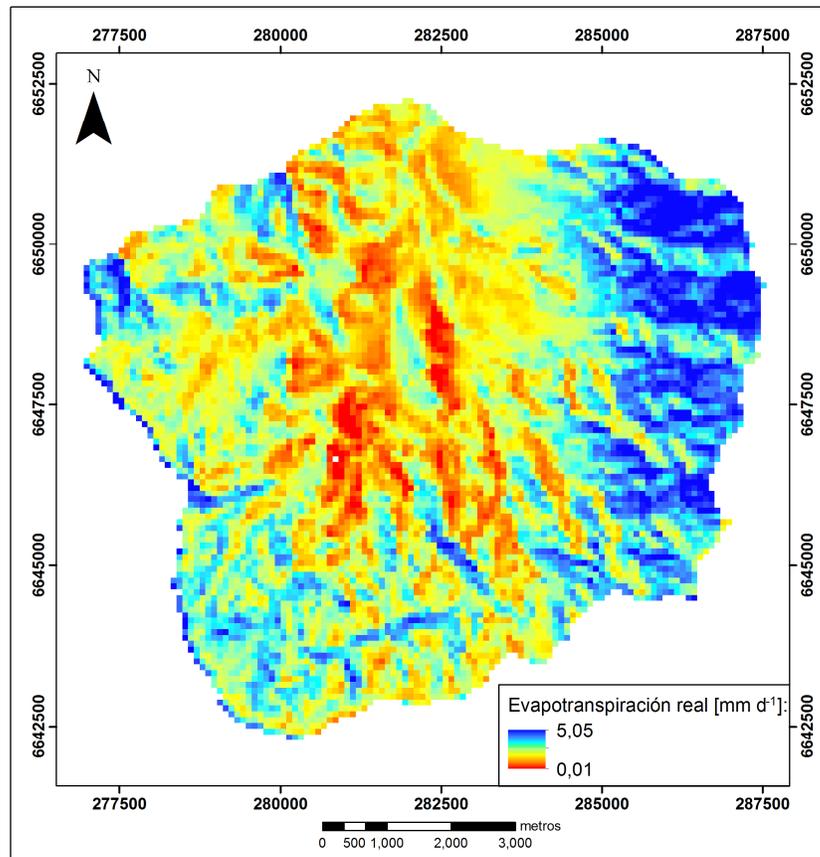


Figura 12. Distribución espacial de la evapotranspiración real a escala diaria [mm d^{-1}].

3.2. Caracterización florística y estructural de la vegetación

3.2.1. Composición florística

La flora leñosa y suculenta total registrada en la cuenca de Las Cardas se encuentra constituida por 58 especies, pertenecientes a 52 géneros y 27 familias (Apéndice V). De éstas, 3 se encuentran identificadas a nivel de género (*Centaurea* sp., *Conyza* sp. y *Haplopappus* sp.) y 4 a nivel infraespecífico (*Chuquiraga ulicina* subsp. *acicularis*, *Copiapoa coquimbana* var. *coquimbana*, *Senecio hakeifolius* var. *hakeifolius* y *Senna cumingii* var. *coquimbensis*).

La familia con mayor número de especies es Asteraceae, abarcando un 32,76% de la flora total, seguida distantes de Fabaceae (6,90%), Anacardiaceae (5,17%), Cactaceae (5,17%) y Solanaceae (5,17%). Las 22 familias restantes, se encuentran compuestas por una o dos especies (Figura 13). A su vez, los géneros con mayor representación de especies son *Baccharis*, con 3 especies y, *Centaurea*, *Haplopappus*, *Schinus* y *Senecio*, todos ellos con 2 especies cada uno. El resto de géneros está integrado sólo por una especie (Apéndice V).

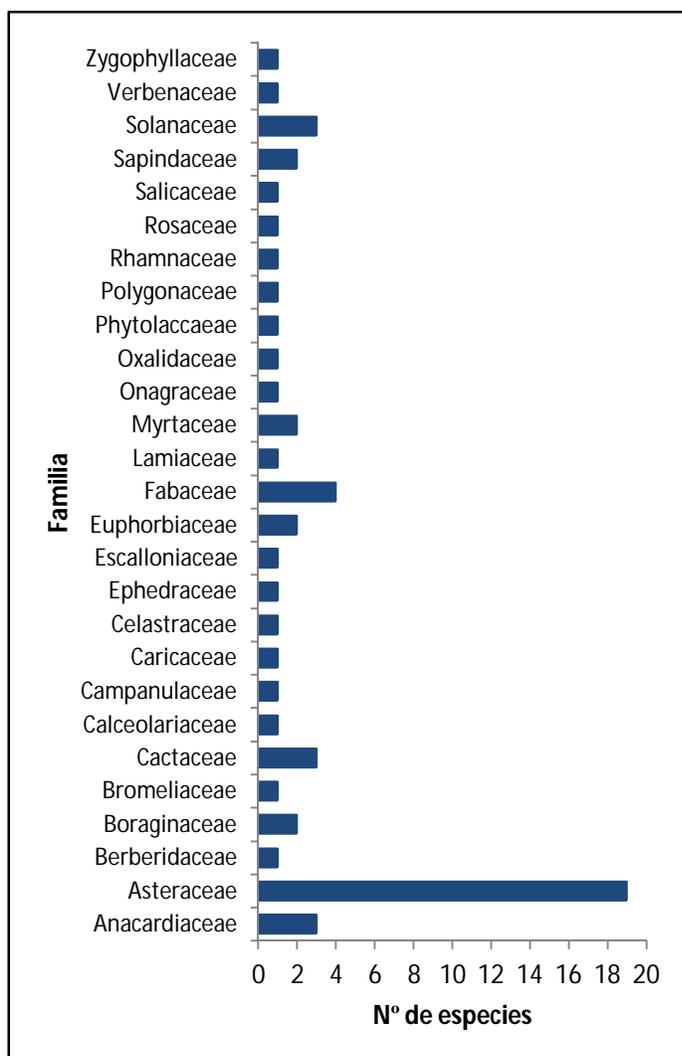


Figura 13. Número de especies vegetales por familia.

De la totalidad de taxones específicos e infraespecíficos detectados en el sitio de estudio (55), sólo *Eucalyptus globulus* es de origen alóctono o introducido; mientras que las 54 especies restantes son autóctonas de Chile (Apéndice V), representando un 11,30% de la flora nativa leñosa y suculenta que posee la Región de Coquimbo (478 especies) (Squeo *et al.*, 2001). De estas especies autóctonas, el 77,78% (42 especies) es endémica del territorio nacional (Apéndice V), de las cuales *Adesmia bedwellii*, *Berberis glomerata* y *Calceolaria collina*, son exclusivamente endémicas de la Región de Coquimbo (Zuloaga *et al.*, 2008), constituyendo éstas últimas un 5,45% de la flora leñosa y suculenta endémica de la región (55 especies) (Squeo *et al.*, 2001).

De acuerdo a la legislación chilena vigente, en el lugar de estudio existen 6 especies en alguna categoría de conservación (Cuadro 3). De éstas, las con mayor riesgo son *Porlieria chilensis* y *Vasconcellea chilensis*, ambas catalogadas en estado Vulnerable.

Cuadro 3. Especies en categorías de conservación de la flora leñosa y suculenta identificada en la cuenca de Las Cardas.

Espece	Categoría de conservación	Fuente
<i>Copiapoa coquimbana</i>	Casi amenazada	D.S N° 41/2011 del MMA
<i>Cordia decandra</i>	Casi amenazada	D.S N° 42/2011 del MMA
<i>Cumulopuntia sphaerica</i>	Preocupación menor	D.S N° 19/2012 del MMA
<i>Eulychnia acida</i>	Preocupación menor	D.S N° 41/2011 del MMA
<i>Porlieria chilensis</i>	Vulnerable	D.S N° 51/2008 del MINSEGPRES
<i>Vasconcellea chilensis</i>	Vulnerable	D.S N° 51/2008 del MINSEGPRES

En relación a los tipos biológicos, se aprecia una gran preponderancia de arbustos, representados por 43 especies, equivalentes a un 74,14% de la flora total. Le siguen los árboles con 11 especies (18,96%) y finalmente las suculentas con 4 especies (6,90%) (Apéndice V).

3.2.2. Atributos estructurales de especies de leñosas y suculentas

A continuación, se describe tanto la estructura horizontal (cobertura), como vertical (altura media del follaje), de las especies leñosas y suculentas más representativas del área de estudio. Estas son 48 especies, correspondientes a 9 arbóreas, 36 arbustivas y 3 suculentas, que pertenecen a 46 géneros y 26 familias. En el Apéndice VI, se muestra la estadística descriptiva de los atributos estructurales de cada una de ellas.

De estas 48 especies, *Flourensia thurifera* y *Gutierrezia resinosa*, son las más características de la cuenca al estar presentes en 22 de los 30 sitios de muestreo (ver Apéndice VII), coincidiendo con lo mencionado en la descripción del lugar de estudio. Ambas especies son arbustivas y endémicas del territorio nacional. La cobertura media de *Flourensia thurifera*, considerando las 30 unidades homogéneas de muestreo, es de $8,44 \pm 9,40$ [%] y su altura media del follaje de $0,16 \pm 0,12$ [m]. En el caso de *Gutierrezia resinosa*, su cobertura media es de $2,87 \pm 4,17$ [%] y su altura media del follaje de $0,15 \pm 0,12$ [m].

3.2.3. Variables vegetacionales por tipo biológico

De los atributos estructurales de especies leñosas y suculentas descritos anteriormente, derivaron 31 variables vegetacionales agrupadas en 5 categorías, éstas son: riqueza, diversidad de especies, cobertura, altura media del follaje y fitovolumen. La estadística descriptiva de cada una de estas variables se presenta en el Cuadro 4, a continuación, y el detalle por sitio de muestreo se puede observar en el Apéndice VIII.

Cuadro 4. Parámetros estadísticos de variables vegetacionales por tipo biológico.

Variable	Mínimo	Máximo	Media	D.E.
Riqueza [n]				
Familias	1	8	4	2
Géneros	2	12	7	2
Total (leñosas y suculentas)	2	12	7	2
Leñosas	2	12	7	2
Arbóreas	0	5	1	1
Arbustivas	2	11	6	2
Suculentas	0	2	0	1
Diversidad de especies (<i>H'</i>)				
Total (leñoso y suculento)	0,153	2,159	1,297	0,526
Leñoso	0,153	2,159	1,229	0,524
Arbóreo	0,000	1,377	0,076	0,271
Arbustivo	0,130	2,037	1,101	0,501
Suculento	0,000	0,690	0,078	0,206
Cobertura [%]				
Herbácea	1,00	78,60	27,33	23,48
Arbustiva	9,20	61,90	24,43	10,25
Arbórea	0,00	63,60	5,44	12,95
Leñosa	11,47	81,70	28,83	14,36
Suculenta	0,00	9,60	1,10	2,65
Leñosa y suculenta	11,47	81,70	29,84	14,15
Total (vegetación)	13,65	92,06	54,75	23,27
Hojarasca	0,84	29,83	10,94	7,22
Suelo desnudo	0,00	61,12	25,40	17,03
Pedregosidad	0,00	23,75	8,92	7,80
Suelo descubierto	1,42	63,43	34,32	19,86
Altura media del follaje [m]				
Herbácea	0,01	0,13	0,05	0,03
Arbustiva	0,15	1,28	0,32	0,20
Arbórea	0,00	1,68	0,36	0,53
Leñosa	0,15	1,49	0,36	0,25
Suculenta	0,00	1,50	0,21	0,43
Fitovolumen [m³ ha⁻¹]				
Herbáceo	27,90	403,15	114,26	106,64
Leñoso	196,94	16200,30	1590,11	2999,49
Total (herbáceo y leñoso)	224,84	16230,34	1704,37	3004,84

Nota: Número de observaciones = 30.

3.2.3.a. Fitovolumen. Los modelos de regresión lineal simple generados para ajustar los datos de fitovolumen herbáceo y leñoso (Cuadro 4), se exponen en la figura siguiente:

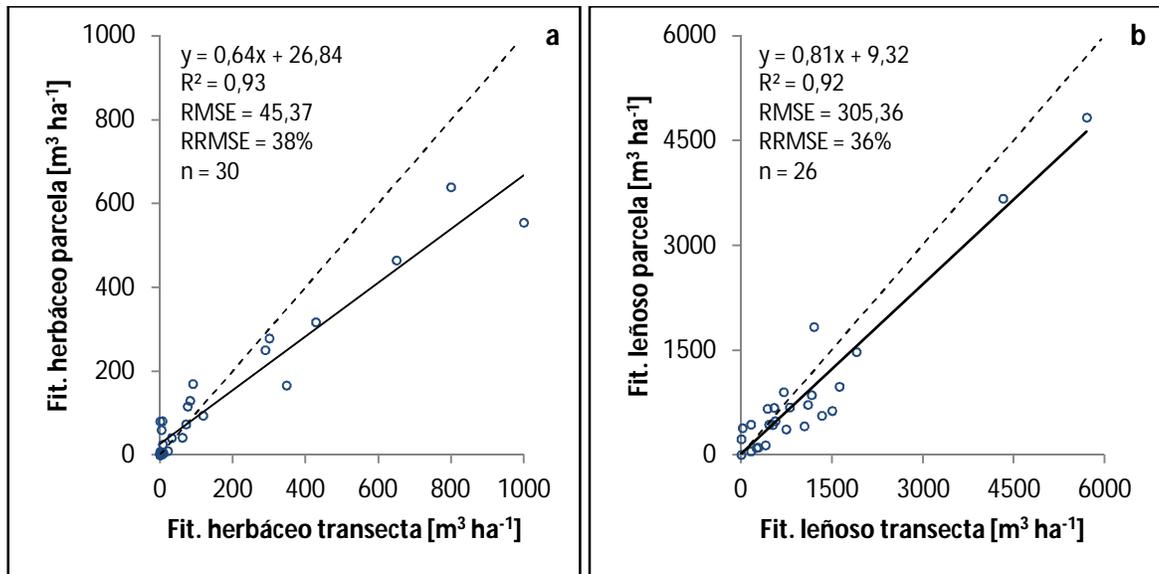


Figura 14. Regresión lineal entre el fitovolumen de la transecta lineal de 5 [m] de longitud y el de la parcela de 25 [m²]: fitovolumen herbáceo (a) y fitovolumen leñoso (b).

Como se puede observar en la Figura 14.a, el coeficiente de determinación (R^2) indica que el modelo explica en un 93% la variabilidad del fitovolumen herbáceo de la parcela de 25 [m²] ($p < 0,001$). Si bien, este estadístico evidencia un buen ajuste del conjunto de datos al modelo lineal, el RRMSE es de un 38%, resaltando la importante dispersión existente en valores bajo los 20 [m³ ha⁻¹] del fitovolumen herbáceo de la transecta lineal de 5 [m] de longitud, en este rango, los datos de la transecta subestiman a los de la parcela, situación que no se manifiesta sobre este valor (20 [m³ ha⁻¹]), donde la dispersión es menor y los valores de la transecta sobrestiman a los de la parcela.

Respecto al fitovolumen leñoso (Figura 14.b), también se aprecia un buen ajuste del conjunto de datos al modelo lineal, con un R^2 igual a 0,92 ($p < 0,001$) y un error levemente menor que el modelo anterior, de un 36%. Sin embargo, para alcanzar este nivel de ajuste fue necesario eliminar aquellos datos atípicos evaluando los residuales del modelo. Particularmente, todos estos sitios presentan una especie leñosa de gran follaje enraizada dentro de la parcela que no es interceptada por la transecta lineal, provocando un aumento significativo del fitovolumen de la parcela en comparación al de la transecta, contrario a lo mostrado en la Figura 14.b.

Una forma de mejorar las estimaciones del fitovolumen a través del método de la transecta lineal, podría ser aplicando más de una línea de intercepción dentro de la unidad de muestreo, con el propósito de reducir al máximo la probabilidad de que una especie de gran follaje enraizada en la parcela, no intercepte con alguna de las transectas. No obstante, es de interés considerar que este procedimiento es adecuado en zonas donde la vegetación es

predominantemente arbustiva y herbácea, y los datos atípicos antes mencionados se deben, en gran medida, a la presencia de numerosas especies arbóreas, no características de ambientes áridos y semiáridos. Pese a ello, los modelos de regresión (Figura 14) demuestran que el método usado determina apropiadamente el fitovolumen en este tipo de ambientes, sobrestimando, en algún grado, al fitovolumen real del área de estudio.

3.3. Relación entre la ET_r y variables vegetacionales y topográficas

3.3.1. ET_r y atributos estructurales de especies leñosas y suculentas

Del total de especies leñosas y suculentas evaluadas (48 especies), 7 se encuentran correlacionadas significativamente con la ET_r , ya sea en su estructura horizontal y/o vertical, todas ellas pertenecientes al tipo biológico leñoso (Cuadro 5). De estas correlaciones, destaca la relación inversa de la ET_r con las especies arbustivas *Haplopappus cerberoanus* y *Flourensia thurifera*, puesto que en sectores con alta disponibilidad hídrica se espera que las plantas desarrollen un mayor follaje (Chapin III *et al.*, 2002), contrario a lo que indican estos resultados. Una posible explicación de la relación antes señalada considera que en sectores con baja ET_r existe un gran número de individuos de *Haplopappus cerberoanus* y/o *Flourensia thurifera*, a diferencia de sitios con alta ET_r en los que es prácticamente nula su presencia, ya que ambas especies se encuentran adaptadas a zonas con baja disponibilidad de agua (Squeo *et al.*, 1999).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Spearman (r_s) significativos entre la ET_r y atributos estructurales de especies leñosas.

Especie	Cobertura		Altura media del follaje	
	r_s	p	r_s	p
<i>Adesmia bedwellii</i>	0,377 *	0,0399	0,404 *	0,0270
<i>Flourensia thurifera</i>	-0,389 *	0,0339	-0,322 ns	0,0830
<i>Fuchsia lycioides</i>	0,376 *	0,0406	0,374 *	0,0419
<i>Kageneckia oblonga</i>	0,387 *	0,0348	0,388 *	0,0340
<i>Haplopappus cerberoanus</i>	-0,571 ***	0,0010	-0,512 **	0,0038
<i>Schinus polygamus</i>	0,400 *	0,0287	0,400 *	0,0287
<i>Solanum pinnatum</i>	0,395 *	0,0307	0,394 *	0,0312

Código de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns, no significativo.

3.3.2. ET_r y variables vegetacionales

De las 32 variables vegetacionales evaluadas¹⁰, 12 presentan una correlación significativa con la ET_r estimada por medio de técnicas de teledetección (Cuadro 6). De estas variables,

¹⁰ Variables agrupadas por tipos biológicos derivadas de los atributos estructurales de las especies leñosas y suculentas, junto con el índice de vegetación SAVI.

la riqueza de especies arbóreas y la altura media de especies herbáceas son las más significativas, con un $p < 0,001$ y coeficiente de correlación igual a 0,59 [-] y 0,58 [-], respectivamente.

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Spearman (r_s) significativos entre la ET_r y variables vegetacionales.

Variable	r_s	p
Riqueza de familias	0,539 **	0,0021
Riqueza de géneros	0,422 *	0,0202
Riqueza total (leñosas y suculentas)	0,414 *	0,0228
Riqueza de leñosas	0,439 *	0,0153
Riqueza de arbóreas	0,588 ***	0,0006
Cobertura de arbóreas	0,562 **	0,0012
Cobertura de leñosas y suculentas	0,364 *	0,0479
Altura media de herbáceas	0,583 ***	0,0007
Altura media del follaje de arbóreas	0,566 **	0,0011
Fitovolumen herbáceo	0,362 *	0,0494
Fitovolumen leñoso	0,371 *	0,0436
Fitovolumen total	0,413 *	0,0233

Código de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Según lo expuesto en el Cuadro 6, la riqueza específica o de grupos taxonómicos mayores está positivamente correlacionada con la ET_r . Lo anterior se sustenta bajo la teoría de la relación especies-energía, que sugiere que la diversidad de especies varía con la cantidad de energía disponible (Currie, 1991; Hawkins *et al.*, 2003; Reiss *et al.*, 2009). Investigaciones al respecto, que incorporan técnicas de percepción remota para caracterizar la energía disponible del ecosistema (Bailey *et al.*, 2004; Verschuyt *et al.*, 2008), evidencian asociaciones directas entre la productividad primaria, representada por el índice de vegetación NDVI (“Normalized Difference Vegetation Index”), y la riqueza específica de aves y mariposas, resultados que concuerdan con los obtenidos.

Por otro lado, atributos estructurales de la vegetación leñosa como la cobertura, altura media del follaje y fitovolumen, muestran una relación lineal directa con la ET_r (Cuadro 6). Esta relación puede ser explicada por singulares adaptaciones morfológicas de algunas especies vegetales leñosas propias de regiones áridas y semiáridas, que tienden a reducir la producción de hojas y aumentar la producción de raíces (Chapin III *et al.*, 2002). La reducción de la superficie foliar provoca una disminución de la cantidad de radiación solar que intercepta la planta, así como la cantidad de agua que se pierde por transpiración. Además, el incremento en la producción de raíces permite que las especies vegetales exploten un mayor volumen de suelo para la extracción de agua. En conjunto, todos estos cambios producen un aumento de la masa de raíces que suministra agua a las hojas, mejorando el equilibrio hídrico, pero provocando una disminución de la tasa fotosintética, que conlleva un menor crecimiento de la planta (Smith y Smith, 2001). De esta forma se

podría justificar que en zonas con baja ET_r el follaje de la vegetación leñosa sea menor, aumentando éste a medida que se incrementa la ET_r .

Adicionalmente, no se encontraron relaciones entre la ET_r y variables vegetacionales del tipo biológico suculento (Cuadro 6), característico de ambientes áridos y semiáridos. La inexistencia de correlación entre especies suculentas y la ET_r se podría deber a que estas plantas utilizan un particular metabolismo fotosintético, conocido como metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, “Crassulacean Acid Metabolism”), que genera que las especies abran sus estomas durante la noche, cuando la temperatura es más baja y la humedad es mayor, lo que les permite ahorrar agua y reducir su pérdida durante el día en condiciones de altas temperaturas y radiación (Smith y Smith, 2001).

Otro aspecto a considerar, en cuanto a las relaciones antes mencionadas, es el régimen de precipitaciones, puesto que se ha demostrado que los aspectos florísticos y estructurales de la vegetación son muy sensibles a las fluctuaciones interanuales de la precipitación, causando, por ejemplo, la ausencia de algunas plantas anuales en un año seco¹¹ (Etienne *et al.*, 1983). En el año 2003, año en que se estimó la ET_r , las precipitaciones acumuladas al mes de septiembre fueron de 123,25 [mm], tres veces mayor a lo acumulado a la misma fecha el año 2012 (41,80 [mm]), año en que se obtuvieron los atributos florísticos y estructurales de la vegetación (ver Anexo I). Estas diferencias pluviométricas manifiestan que lo captado por el sensor el año 2003 difiere de lo registrado en terreno el año 2012. Por lo tanto, lo ideal hubiese sido tener una imagen satelital del mismo año en que se caracterizó la vegetación, para realizar una investigación con mayor consistencia. No obstante, como las especies herbáceas no fueron incorporadas en términos florísticos dentro del muestreo, los datos de riqueza expuestos anteriormente no deberían variar entre un año y otro¹² y, a su vez, como sólo se utilizó la parte viva (verde) de la especie vegetal para determinar los atributos estructurales de la vegetación, los registros al ser comparados entre sitios de muestreo, deberían ser proporcionales entre un año y otro.

Respecto al modelo de regresión lineal multivariado, las variables vegetacionales que en conjunto mejor explican la ET_r son la altura media de especies herbáceas y la riqueza de especies arbóreas (Cuadro 7). El modelo predictivo construido a partir de estas variables explica un 46% de la variabilidad de la ET_r , con un error medio cuadrado (RMSE) de 0,69 [mm d⁻¹], que corresponde a un 32% de incertidumbre (Figura 15).

Cuadro 7. Mejor modelo de regresión de ET_r usando variables vegetacionales.

	Coefficiente	Error estándar	Valor t	Pr (> t)	
(Intercepto)	1,251	0,254	4,926	0,0000	***
Altura media de herbáceas	14,093	4,657	3,026	0,0054	**
Riqueza de arbóreas	0,402	0,134	3,008	0,0056	**

Código de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

¹¹ Se considera un año seco cuando la pluviometría es 20% menos de lo normal (Etienne *et al.*, 1983).

¹² Bajo el sustento del análisis espacio-temporal del vigor vegetal en los sitios de muestreo (ver Figura 23).

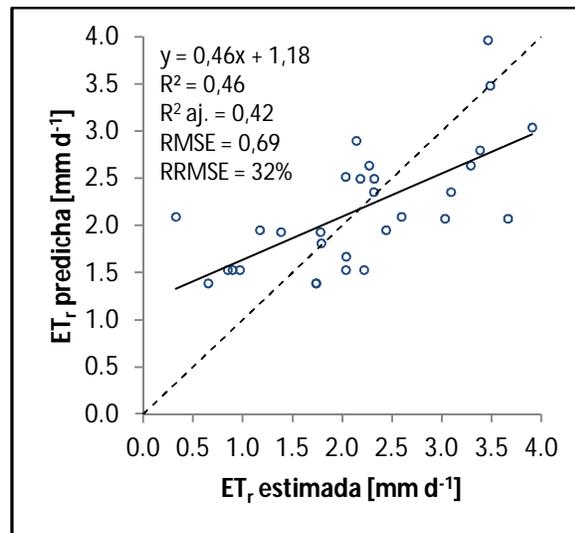


Figura 15. Comparación entre la ET_r predicha por el modelo de regresión usando variables vegetacionales y la ET_r estimada por el algoritmo S-SEBI.

3.3.3. ET_r y variables topográficas

De la totalidad de variables topográficas evaluadas (5 variables), 4 se encuentran asociadas significativamente con la ET_r (Cuadro 8). De éstas, la altitud es aquella más significativa, con un coeficiente de correlación equivalente a 0,60 [-] ($p < 0,001$).

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson (r) o Spearman (r_s) significativos entre la ET_r y variables topográficas.

Variable	r	r_s	p
MrVBF		-0,409 *	0,0250
Altitud	0,604 ***		0,0004
Exposición normalizada al norte		-0,492 **	0,0057
Exposición normalizada al este		-0,415 *	0,0225

Código de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

La relación entre la ET_r y los atributos topográficos del paisaje (Cuadro 8) se explica principalmente por una condición hidrológica singular que afecta a la región de estudio, la presencia de abundante nubosidad costera, comúnmente conocida como camanchaca. Según López-Cortés y López (2004), la neblina constituye una fuente de agua adicional para los ecosistemas áridos y semiáridos, y es más estable en el tiempo que las precipitaciones, que están sujetas a una marcada variabilidad interanual. Esta nubosidad se concentra en torno a los relieves más altos, proporcionando una entrada adicional de agua en estas zonas y, por ende, mayores tasas de ET_r (Garreaud *et al.*, 2008). Complementariamente y acorde lo informado por el índice de geoforma MrVBF, en laderas escarpadas el agua no es retenida, lo que genera menores valores de ET_r (Taylor *et al.*, 2013). Adicionalmente, la exposición normalizada al este también se encuentra asociada a

la ET_r producto de la camanchaca, debido a que las masas de aire son transportadas en sentido sur-este desde el Océano Pacífico (López-Cortés y López, 2004), concentrando la neblina en las zonas de barlovento, que se traduce en mayores tasas de ET_r en las laderas de exposición oeste (Figura 12).

Por otro lado, la relación entre la exposición normalizada al norte y la ET_r puede ser explicada por la radiación solar incidente. Las laderas de exposición norte reciben mayor radiación que las laderas de exposición sur, generando contrastes hídricos significativos entre una orientación y otra (Gao *et al.*, 2011). En consecuencia, las laderas de exposición sur son más húmedas que su contraparte y, por lo tanto, los niveles de ET_r son mayores.

Respecto al modelo de regresión lineal multivariado, las variables topográficas que en conjunto mejor explican la ET_r son la altitud, la exposición normalizada al norte y la exposición normalizada al este (Cuadro 9). El modelo predictivo construido a partir de estas variables explica un 67% de la variabilidad de la ET_r , con un RMSE de 0,53 [$mm\ d^{-1}$], que corresponde a un 25% de incertidumbre (Figura 16).

Cuadro 9. Mejor modelo de regresión de ET_r usando variables topográficas.

	Coefficiente	Error estándar	Valor t	Pr (> t)
(Intercepto)	0,327	0,474	0,690	0,4965
Altitud	0,004	0,001	3,951	0,0005 ***
Exposición normalizada al norte	-0,665	0,175	-3,803	0,0008 ***
Exposición normalizada al este	-0,516	0,139	-3,716	0,0010 ***

Código de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

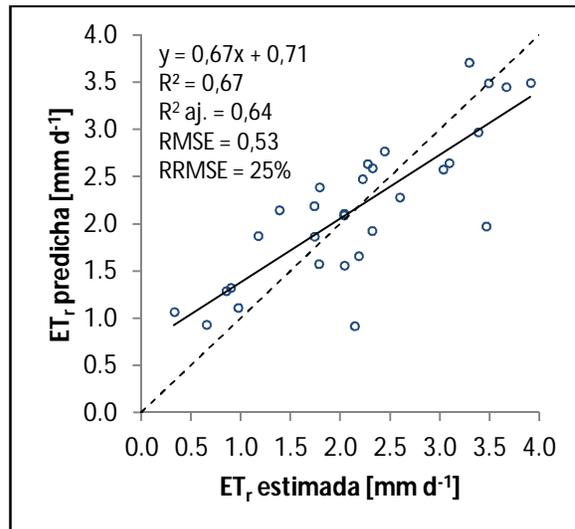


Figura 16. Comparación entre la ET_r predicha por el modelo de regresión usando variables topográficas y la ET_r estimada por el algoritmo S-SEBI.

3.3.4. ET_r y variables vegetacionales y topográficas

Las variables vegetacionales y topográficas que en conjunto mejor explican la ET_r son: altura media de plantas herbáceas, riqueza de especies arbóreas, altitud, exposición normalizada al norte y exposición normalizada al este. De éstas, la riqueza de especies arbóreas, la altitud y la exposición normalizada al este son las más significativas, con un $p < 0,001$ (Cuadro 10). El modelo predictivo construido a partir de estas variables explica un 88% de la variabilidad de la ET_r , con un RMSE de 0,33 [mm d^{-1}], que corresponde a un 15% de incertidumbre (Figura 17).

Cuadro 10. Mejor modelo de regresión de ET_r usando variables vegetacionales y topográficas.

	Coefficiente	Error estándar	Valor t	Pr (> t)
(Intercepto)	0,079	0,318	0,248	0,8066
Altura media de herbáceas	7,348	3,360	2,187	0,0387 *
Riqueza de arbóreas	0,419	0,072	5,834	0,0000 ***
Altitud	0,003	0,001	3,758	0,0010 ***
Exposición normalizada al norte	-0,283	0,130	-2,183	0,0391 *
Exposición normalizada al este	-0,607	0,093	-6,547	0,0000 ***

Código de significancia: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

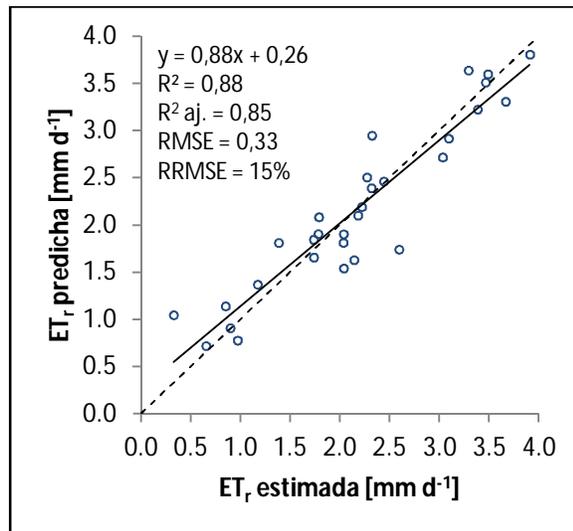


Figura 17. Comparación entre la ET_r predicha por el modelo de regresión usando variables vegetacionales y topográficas, y la ET_r estimada por el algoritmo S-SEBI.

4. CONCLUSIONES

La evapotranspiración real obtenida mediante técnicas de modelamiento basado en teledetección satelital, presentó una importante variabilidad espacial a comienzos de la época primaveral. Esto dejó en evidencia la escasa disponibilidad hídrica de ambientes áridos y semiáridos, y demostró relevantes relaciones con la composición florística, estructura de la vegetación y atributos topográficos del paisaje.

Dentro de los atributos florísticos de la vegetación destaca la relación directa entre la riqueza y la ET_r , sustentada bajo la teoría de la relación especies-energía, que sugiere que la diversidad de especies varía con la cantidad de energía disponible. A su vez, atributos estructurales de la vegetación leñosa como la cobertura, altura media del follaje y fitovolumen, también se encuentran asociados positivamente con la ET_r . Lo anterior puede ser explicado por singulares adaptaciones morfológicas de algunas especies vegetales leñosas propias de zonas áridas y semiáridas, que tienden a reducir la producción de hojas y aumentar la producción de raíces para mejorar el equilibrio hídrico.

Del mismo modo, se encontraron fuertes correlaciones entre la ET_r y las variables topográficas, cuya relación puede ser explicada principalmente por una particular condición hidrológica que afecta al lugar de estudio, la nubosidad costera, que genera una entrada adicional de agua en estos ecosistemas más estable que las precipitaciones.

Finalmente, se concluye que la ET_r obtenida mediante técnicas de teledetección satelital es un aporte para comprender el funcionamiento de la vegetación nativa de zonas áridas y semiáridas. Además, se sugiere realizar a futuro este mismo estudio en otra época del año, para evaluar si las variables que explican la ET_r se mantienen o cambian bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo.

5. BIBLIOGRAFÍA

Abrams, M.; S. Hook and B. Ramachandran. 2002. ASTER user handbook. Version 2. USA: Jet Propulsion Laboratory and California Institute of Technology. 135p.

Aguiar, M.; J.M. Paruelo; O. Sala and W. Lauenroth. 1996. Ecosystem responses to changes in plant functional type composition: an example from the Patagonian steppe. *Journal of Vegetation Science*, 7: 381-390.

Aguiar, M. and O. Sala. 1999. Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 14: 273-277.

Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia: FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 298p. (Estudio FAO Riego y Drenaje N° 56).

Arias, P. y G. Poveda. 2007, mar. Estimación de la relación adimensional de Budyko en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 31(118): 69-78.

Armesto, J.J. and J.A. Martínez. 1978. Relations between vegetation structure and slope aspect in the Mediterranean region of Chile. *Journal of Ecology*, 66: 881-889.

Armesto, J.J.; P.E. Vidiella and J.R. Gutiérrez. 1993. Plant communities of the fog-free coastal desert of Chile: plant strategies in a fluctuating environment. *Revista Chilena de Historia Natural*, 66: 271-282.

Bailey, S.A.; M.C. Horner-Devine; G. Luck; L.A. Moore; K.M. Carney; S. Anderson *et al.* 2004. Primary productivity and species richness: relationships among functional guilds, residency groups and vagility classes at multiple spatial scales. *Ecography*, 27(2): 207-217.

Bastiaanssen, W.G.M.; M. Menenti; R.A. Feddes and A.A.M. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213: 198-212.

Blanco, P. and R.M. Navarro. 2003. Aboveground phytomass models for major species in shrub ecosystems of western Andalusia. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(3): 47-55.

Boronina, A. and G. Ramillien. 2008. Application of AVHRR imagery and GRACE measurements for calculation of actual evapotranspiration over the Quaternary aquifer

(Lake Chad basin) and validation of groundwater models. *Journal of Hydrology*, 348: 98-109.

Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45: 5-32.

Brutsaert, W. 1975, oct. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, 11(5): 742-744.

Cabello, J. y J.M. Paruelo. 2008, sep. La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas*, 17(3): 1-3.

Cabello, J.; N. Fernández; D. Alcaraz-Segura; C. Oyonarte; G. Piñeiro; A. Altesor *et al.* 2012, sep. The ecosystem functioning dimension in conservation: insights from remote sensing. *Biodiversity and Conservation*, 21: 3287-3305.

Canfield, R.H. 1941, apr. Application of the line interception method in sampling range vegetation. *Journal of Forestry*, 39(4): 388-394.

Caratti, J.F. 2006. Line intercept (LI): sampling method (pp. 198-210). In: Lutes, D.C. (Ed.). Firemon: fire effects monitoring and inventory system. Fort Collins, Colorado, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 400p.

Cardinale, B.; K. Matulich; D. Hooper; J. Byrnes; E. Duffy; L. Gamfeldt *et al.* 2011. The functional role of producer diversity in ecosystems. *American Journal of Botany*, 98(3): 572-592.

Cepeda-Pizarro, J.G. 1993. Litter decomposition in deserts: an overview with an example from coastal arid Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 66: 323-336.

Chander, G.; B.L. Markham and D.L. Helder. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113: 893-903.

Chapin III, F.; P. Matson and H. Mooney. 2002. Terrestrial water and energy balance (ch. 4, pp. 71-96). In his: Principles of terrestrial ecosystem ecology. New York, USA: Springer-Verlag. 398p.

Chávez, P.S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24: 459-479.

Chehbouni, A.; J.C.B. Hoedjes; J. Rodriguez; C.J. Watts; J. Garatuza; F. Jacob *et al.* 2008. Using remotely sensed data to estimate area-averaged daily surface fluxes over a semi-arid mixed agricultural land. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 330-342.

Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. Barcelona, España: Ariel Ciencia. 586p.

Coulloudon, B.; K. Eshelman; J. Gianola; N. Habich; L. Hughes; C. Johnson *et al.* 1999. Line intercept method (pp. 64-69). *In his: Sampling vegetation attributes*. Denver, Colorado, USA: Bureau of Land Management's National Applied Resource Sciences Center. 164p.

Currie, D.J. 1991. Energy and large-scale patterns of animal-and plant-species richness. *American Naturalist*, 137: 27-49.

De Wit, C.; J. Goudriaan; H. Van Laar; F. Penning de Vries; R. Rabbinge; H. Van Keulen *et al.* 1978. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Wageningen, The Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation (PUDOC). 141p.

Escribano, P.; A. Palacios-Orueta y C. Oyonarte. 2008, sep. Cuantificación y distribución espacial de los tipos de cubierta en los ecosistemas semiáridos con imágenes hiperespectrales, caso práctico en el Parque Natural Cabo de Gata-Níjar (Almería). *Ecosistemas*, 17(3): 79-88.

Etienne, M. y C. Prado. 1982. Descripción de la vegetación mediante la cartografía de ocupación de tierras: conceptos y manual de uso práctico. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. 120p. (Ciencias Agrícolas N° 10).

Etienne, M.; E. Caviedes y C. Prado. 1983. Bases ecológicas para el desarrollo de la zona árida mediterránea de Chile: elementos para una planificación a nivel regional. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. 69p.

Fox, J. 2008. Applied regression analysis and generalized linear models. 2nd ed. USA: SAGE Publications, Inc. 688p.

Gajardo, R. 1994. La vegetación natural de Chile: clasificación y distribución geográfica. Santiago, Chile: Editorial Universitaria. 165p.

Gallant, J.C. and T.I. Dowling. 2003, dec. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12): 1347.

Gallardo-Cruz, J.A.; E.A. Pérez-García and J.A. Meave. 2009. β -diversity and vegetation structure as influenced by slope aspect and altitude in a seasonally dry tropical landscapes. *Landscape Ecology*, 24: 473-482.

Galleguillos, M.; F. Jacob; L. Prévot; P. Lagacherie and S. Liang. 2011a, jan. Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(1): 168-172.

Galleguillos, M.; F. Jacob; L. Prévot; A. French and P. Lagacherie. 2011b, jun. Comparison of two temperature differencing methods to estimate daily evapotranspiration over a

Mediterranean vineyard watershed from ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 115(6): 1326-1340.

Gao, Z.Q.; C.S. Liu; W. Gao and N.B. Chang. 2011, jan. A coupled remote sensing and the surface energy balance with topography algorithm (SEBTA) to estimate actual evapotranspiration over heterogeneous terrain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 119-139.

Garreaud, R.; J. Barichivich; D.A. Christie and A. Maldonado. 2008, nov. Interannual variability of the coastal fog at Fray Jorge relict forests in semiarid Chile. *Journal of Geophysical Research*, 113: 1-16.

Gilabert, M.A.; J. González-Piqueras y J. García-Haro. 1997, dic. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8: 1-10.

Gómez, M.; A. Olioso; J.A. Sobrino and F. Jacob. 2005. Retrieval of evapotranspiration over the Alpillles/ReSeDa experimental site using airborne POLDER sensor and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 96: 399-488.

Gonzalez, M.; L. Augusto; A. Gallet-Budynek; J. Xue; N. Yauschew-Raguene; D. Guyon *et al.* 2013. Contribution of understory species to total ecosystem aboveground and belowground biomass in temperate *Pinus pinaster* Ait. forests. *Forest Ecology and Management*, 289: 38-47.

Guo, X.Y. 2005. Distribution of evapotranspiration over Heihe River basin using remote sensing method. *Progress in Natural Science*, 1510: 1266-1270.

Hawkins, B.A.; R. Field; H.V. Cornell; D.J. Currie; J. Guegan; D.M. Kaurman *et al.* 2003. Energy, water and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology*, 84: 3105-3117.

Heckenlaible, D. and C. Torbert. 2007. Landsat 7 (L7) Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Level Zero-R distribution Product (LORP) Data Format Control Book (DFCB). Version 8.0. USA: U.S. Geological Survey (USGS) and Earth Resources Observation and Science (EROS). 69p.

Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3): 295-309.

IREN (Instituto de Investigación de Recursos Naturales), Chile. 1977. Estudio de las comunidades agrícolas de la IV Región: caracterización climática. Santiago, Chile: IREN. 35p. (Publicación N° 20).

Kalma, J.; T. McVicar and M. McCabe. 2008, aug. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29: 421-469.

Kent, M. and P. Coker. 1998. Vegetation description and analysis: a practical approach. New York, USA: John Wiley & Sons Ltd. 363p.

Koepfen, W. 1948. Climatología. México: Fondo de Cultura Económica. 478p.

Lailhacar, S. y M. Aylwin. 1988. Efecto de tres especies leñosas en algunas variables del suelo y del estrato herbáceo en la pradera de clima mediterráneo árido. *Simiente*, 58: 51-61.

Lailhacar, S., W. Luzio y R. Gutiérrez. 1989. Variables edáficas a considerarse en la elección de terrenos para plantaciones con el arbusto forrajero *Atriplex nummularia* Lindl. *Avances en Producción Animal (Chile)*, 14(1-2): 27-39.

Li, X.Y. 2011. Hydrology and biochemistry of semiarid and arid regions (ch. 13, pp. 285-299). In: *Levia, D.F.; D. Carlyle-Moses and T. Tanaka (Eds.)*. Forest, hydrology and biochemistry: synthesis of past research and future directions. New York, USA: Ecological Studies 216. 740p.

Liang, S. 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76: 213-238.

López-Cortés, F. y D. López. 2004. Antecedentes bioclimáticos del Parque Nacional bosque Fray Jorge (cap. 2, pp. 45-60). En: *Squeo, F.A.; J.R. Gutiérrez e I.R. Hernández (Eds.)*. Historia natural del Parque Nacional bosque Fray Jorge. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena. 319p.

Maestre, F.; J. Quero; N. Gotelli; A. Escudero; V. Ochoa; M. Delgado-Baquerizo *et al.* 2012, jan. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science*, 335: 214-218.

Malagnoux, M.; E.H. Sène and N. Atzmon. 2007, abr. Forests, trees and water in arid lands: a delicate balance. *Unasylva*, 58(229): 24-29.

Mancilla-Leytón, J.M.; R. Pino and A. Martín. 2013. Do goats preserve the forest? evaluating the effects of grazing goats on combustible Mediterranean scrub. *Applied Vegetation Science*, 16: 63-73.

Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis. Washington DC, USA: World Resources Institute. 86p.

Mitchell, P.J.; E. Veneklaas; H. Lambers and S.S.O. Burgess. 2009. Partitioning of evapotranspiration in a semi-arid eucalypt woodland in south-western Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 25-37.

Mittermeier, R.A.; P.R. Gil; M. Hoffmann; J. Pilgrim; T. Brooks; C.G. Mittermeier *et al.* 2004. Hotspot revisited: earth's biologically wealthiest and most threatened ecosystems. México DF, México: CEMEX. 392p.

Norman, J.M.; W.P. Kustas and K. Humes. 1995. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 263-293.

Noy-Meir, I. 1973. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4: 25-51.

Ogawa, K.; T. Schmugge; F. Jacob and A. French. 2003, jan. Estimation of land surface window (8-12 μm) emissivity from multispectral thermal infrared remote sensing: a case study in a part of Sahara desert. *Geophysical Research Letters*, 30(2): 1067.

Olivera-Guerra, L.; C. Mattar and M. Galleguillos. 2014. Estimation of real evapotranspiration and its variation in Mediterranean landscapes of central-southern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28: 160-169.

Paruelo, J.M. 2008, sep. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17(3): 4-22.

Pearson, K. 1896. Mathematical contributions to the theory of evolution: III. Regression, heredity and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 187: 253-318.

Reiss, J., J.R. Bridle, J.M. Montoya and G. Woodward. 2009. Emerging horizons in biodiversity and ecosystem functioning research. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(9): 505-514.

Reynolds, J.F.; D.M. Stafford; E.F. Lambin; B.L. Turner II; M. Mortimore; S.P.J. Batterbury *et al.* 2007, may. Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 316: 847-851.

Roerink, G.J.; Z. Su and M. Menenti. 2000. S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth. Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2): 147-157.

Sánchez, M. 2001. Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28: 3-10.

Sánchez, J.M. 2008. Estimación mediante teledetección de la evapotranspiración real a partir de un modelo desacoplado de dos fuentes. Tesis Doctoral. Valencia, España: Universidad de Valencia, Facultad de Física. 174p.

Sánchez, J.M.; W.P. Kustas; V. Caselles and M.C. Anderson. 2008, mar. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112: 1130-1143.

Scaramuzza, P.; E. Micijevic and G. Chander. 2004. SLC gap-filled products: phase one methodology. USA: U.S. Geological Survey (USGS). 5p.

Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. The mathematical theory of communication. Urbana, Illinois, USA: University of Illinois Press. 125p.

Shapiro, S.S. and M.B. Wilk. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52: 591-611.

Smith, R. y T. Smith. 2001. Ecología. 4ª ed. Madrid, España: Pearson Educación S.A. 664p.

Sobrino, J.A.; M. Gómez; J.C. Jiménez-Muñoz and A. Oliso. 2007. Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, 110: 139-148.

Soria, J. y R. Granados. 2005, jul-oct. Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. *Ciencia Ergo Sum*, 12(2): 167-174.

Spearman, C. 1904, jan. The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology*, 15(1): 72-101.

Squeo, F.A.; N. Olivares; S. Olivares; A. Pollastri; E. Aguirre; R. Aravena *et al.* 1999. Grupos funcionales en arbustos desérticos del norte de Chile, definidos sobre la base de las fuentes de agua utilizadas. *Gayana Botánica*, 56(1): 1-15.

Squeo, F.A.; G. Arancio y J.R. Gutiérrez (Eds.). 2001. Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena. 372p.

Squeo, F.A.; R.A. Estévez; A. Stoll; C.F. Gaymer; L. Letelier and L. Sierralta. 2012. Towards the creation of an integrated system of protected areas in Chile: achievements and challenges. *Plant Ecology and Diversity*, 5(2): 233-243.

Su, Z. 2002. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1): 85-99.

Taylor, J.A.; F. Jacob; M. Galleguillos; L. Prévot; N. Guix and P. Lagacherie. 2013. The utility of remotely-sensed vegetative and terrain covariates at different spatial resolutions in modelling soil and watertable depth (for digital soil mapping). *Geoderma*, 193-194: 83-93.

Teillet, P.M.; B. Guindon and D.G. Goodeonugh. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8: 84-106.

Universidad de Chile. 2012. Centro de estudios de zonas áridas (CEZA). [En línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Recuperado en: <<http://www.agronomia.uchile.cl/centros/ceza/2.html>> Consultado el: 21 de marzo de 2012.

Van Wambeke, A. y W. Luzio. 1982. Determinación de los regímenes de humedad y temperatura para los suelos de Chile. *Agricultura Técnica (Chile)*, 42(2): 149-159.

Verschuyt, J.; A. Hansen; D. McWethy; R. Sallabanks and R. Hutto. 2008, jul. Is the effect of forest structure on bird diversity modified by forest productivity?. *Ecological Applications*, 18(5): 1155-1170.

Verstraeten, W.W.; F. Veroustraete and J. Feyen. 2005. Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA-imagery at satellite overpass time: towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products. *Remote Sensing of Environment*, 96: 256-276.

Vicente-Serrano, S.M.; J.M. Cuadrat-Prats y A. Romo. 2005, jun. Análisis estacional de la influencia climática sobre la variabilidad espacio-temporal del NDVI en el centro del valle del Ebro. *Revista de Teledetección*, 23: 51-64.

Wang, Y.; T. Chang and Y. Liou. 2010, apr. Terrain correction for increasing the evapotranspiration estimation accuracy in a mountainous watershed. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(2): 352-356.

Wilkerson, G.G.; J.W. Jones; K.J. Boote; K.T. Ingram and J.W. Mishoe. 1983. Modeling soybean growth for crop management. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 26: 63-73.

Zar, J.H. 2010. Biostatistical analysis. 5th ed. New Jersey, USA: Pearson Education, Inc. 944p.

Zuloaga, F.O.; O. Morrone y M.J. Belgrano (Eds.). 2008. Catálogo de las plantas vasculares del Cono Sur (Argentina, Sur de Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay). [En línea]. Tres volúmenes. Argentina: Instituto de Botánica Darwinion. Recuperado en: <<http://www2.darwin.edu.ar/Proyectos/FloraArgentina/FA.asp>> Consultado el: 17 de noviembre de 2013.

6. ANEXOS

Anexo I. Registro pluviométrico de la estación meteorológica Las Cardas

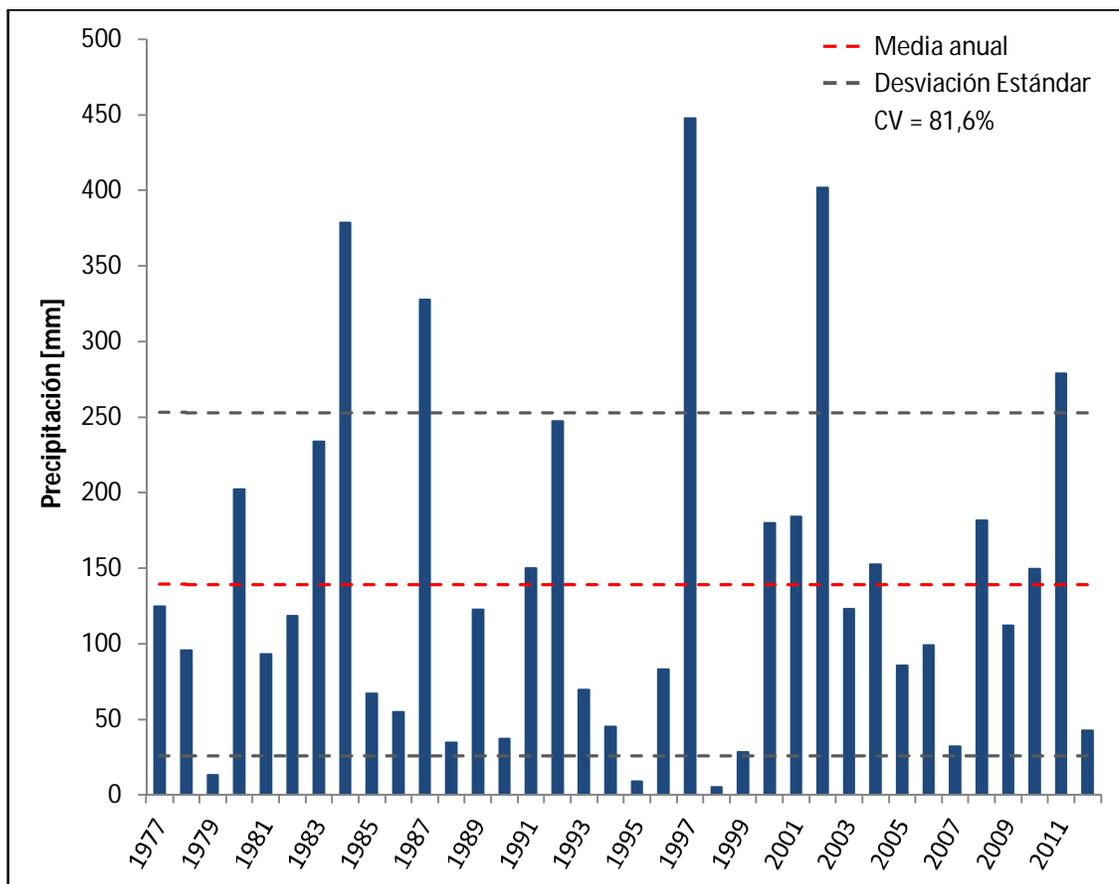


Figura 18. Precipitación anual de la estación meteorológica Las Cardas entre los años 1977 y 2012.

Fuente: Elaboración propia en base a CEZA (2013).

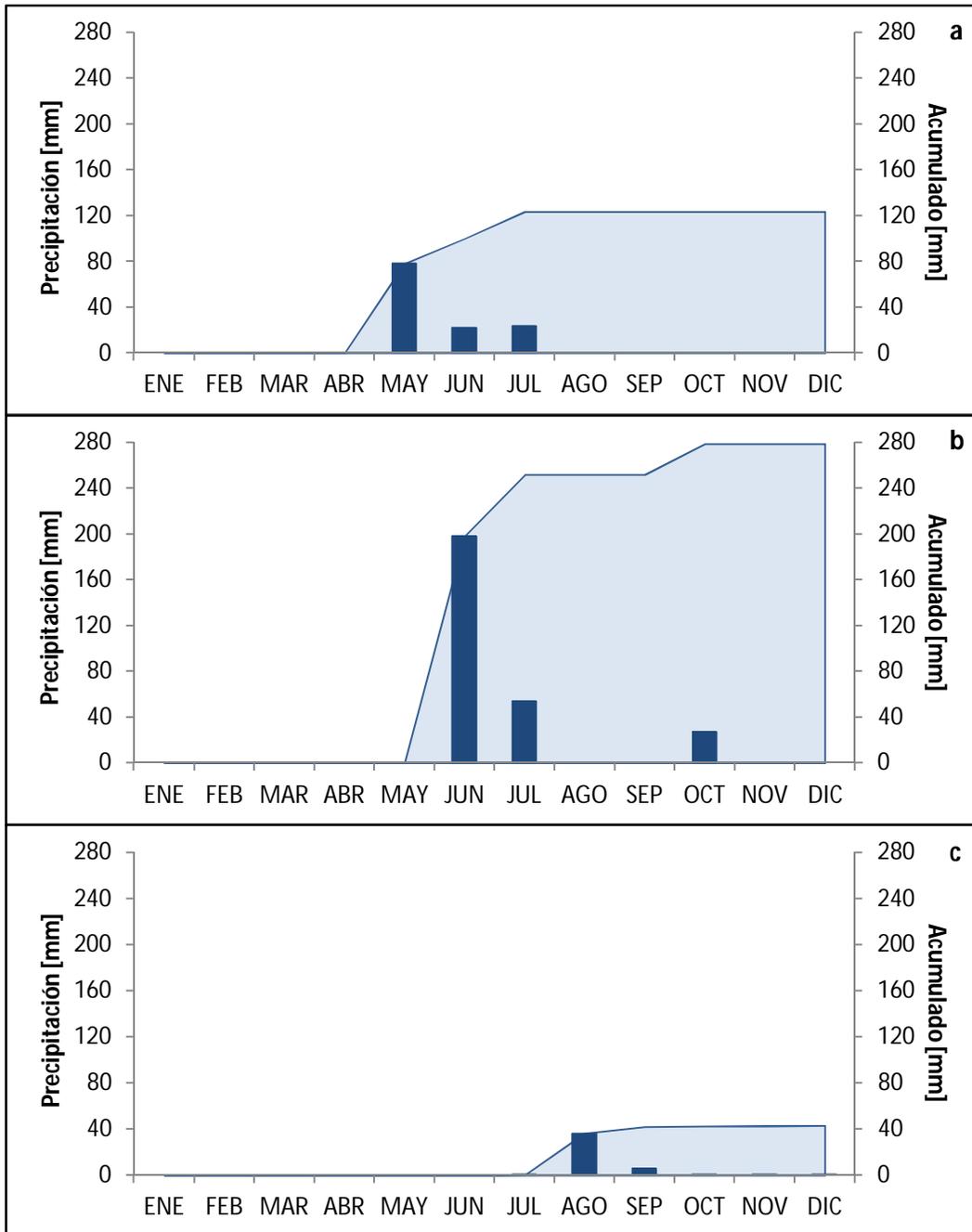


Figura 19. Precipitación mensual de la estación meteorológica Las Cardas en los años 2003 (a), 2011 (b) y 2012 (c).

Fuente: Elaboración propia en base a CEZA (2013).

Anexo II. Características de los sensores ASTER y ETM+

Cuadro 11. Características de los subsistemas del sensor ASTER.

Subsistema	Banda	Rango espectral [μm]	Región espectral	Resolución espacial [m]	Resolución radiométrica [bits]
VNIR	1	0,52 - 0,60	Visible (Verde)	15	8
	2	0,63 - 0,69	Visible (Rojo)		
	3N	0,78 - 0,86	NIR		
	3B	0,78 - 0,86	NIR		
SWIR	4	1,60 - 1,70	SWIR	30	8
	5	2,145 - 2,185	SWIR		
	6	2,185 - 2,225	SWIR		
	7	2,235 - 2,285	SWIR		
	8	2,295 - 2,365	SWIR		
	9	2,360 - 2,430	SWIR		
TIR	10	8,125 - 8,475	TIR	90	12
	11	8,475 - 8,825	TIR		
	12	8,925 - 9,275	TIR		
	13	10,25 - 10,95	TIR		
	14	10,95 - 11,65	TIR		

Fuente: Elaboración propia en base a Abrams *et al.* (2002).

Cuadro 12. Características de las bandas espectrales del sensor ETM+.

Banda	Rango espectral [μm]	Región espectral	Resolución espacial [m]	Resolución radiométrica [bits]
1	0,452 - 0,514	Visible (Azul)	30	8
2	0,519 - 0,601	Visible (Verde)	30	8
3	0,631 - 0,692	Visible (Rojo)	30	8
4	0,772 - 0,898	NIR	30	8
5	1,547 - 1,748	SWIR	30	8
6L	10,31 - 12,36	TIR	60	8
6H	10,31 - 12,36	TIR	60	8
7	2,065 - 2,346	SWIR	30	8
8	0,515 - 0,896	Pancromático	15	8

Fuente: Elaboración propia en base a Heckenlaible y Torbert (2007) y Chander *et al.* (2009).

Anexo III. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) de la estación meteorológica Las Cardas

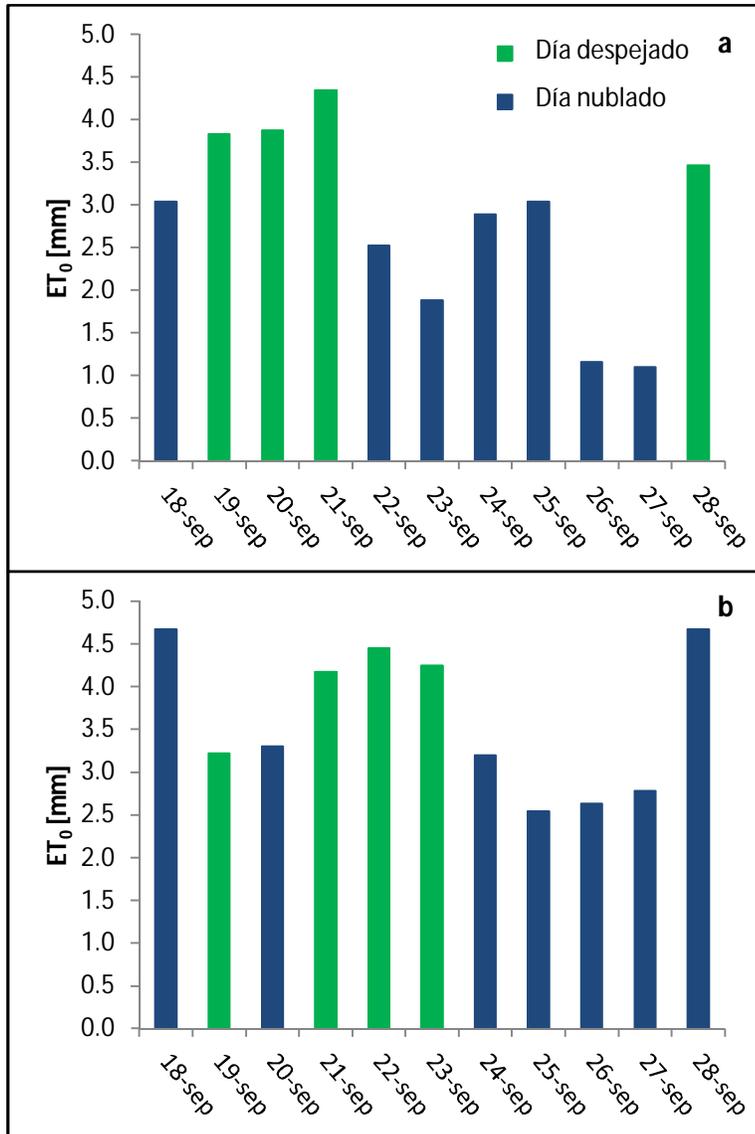


Figura 20. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) diaria registrada en el mes de septiembre en la estación meteorológica Las Cardas en los años 2012 (a) y 2013 (b).

Fuente: Elaboración propia en base a CEAZA-Met (2013).

7. APÉNDICES

Apéndice I. Métodos de estimación de las variables de entrada del algoritmo S-SEBI

Los métodos aplicados para obtener las variables: fracción evaporativa (A), radiación neta (R_n) y coeficiente de la razón entre la radiación neta diaria e instantánea (C_{di}); requeridas para estimar la evapotranspiración real, se exponen a continuación:

Fracción evaporativa (A)

Acorde a lo establecido por Roerink *et al.* (2000), esta variable se estimó a partir de la relación entre la temperatura superficial y la reflectancia superficial sobre el sitio de estudio. La temperatura de superficie (T_s) se obtuvo directamente del producto oficial ASTER corregido topográficamente; mientras que la reflectancia o albedo de superficie (α_s) fue calculada mediante el método propuesto por Liang (2001), que implica la suma ponderada de los canales del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta del sensor ASTER, como se indica en la Ecuación 11, representando la proporción de la radiación solar incidente que resulta ser reflejada. La Figura 21 muestra un esquema teórico de la relación entre T_s y α_s , junto con los principios básicos del algoritmo S-SEBI.

$$\alpha_s = 0,484\rho_1 + 0,335\rho_3 - 0,324\rho_5 + 0,551\rho_6 + 0,305\rho_8 - 0,367\rho_9 - 0,0015 \quad \text{Ec. 11}$$

Donde,

ρ_i : Banda de reflectancia superficial del sensor ASTER ($i = 1 - 9$)

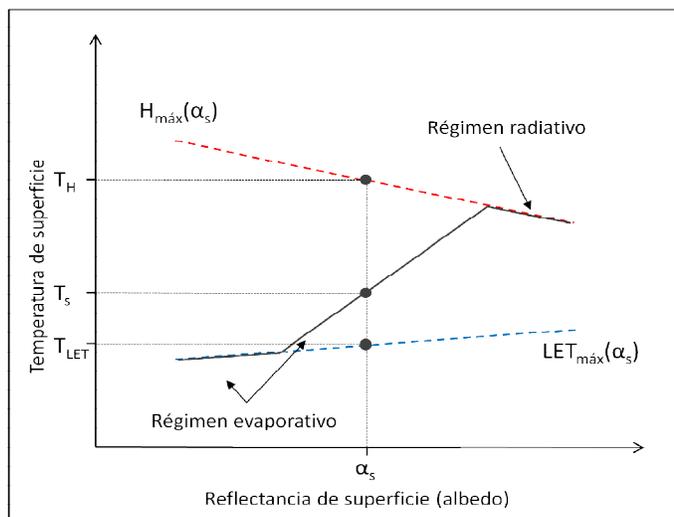


Figura 21. Relación entre la temperatura de superficie y la reflectancia de superficie. Fuente: Elaboración propia en base a Roerink *et al.* (2000).

Como se aprecia en la Figura 21, a valores bajos de reflectancia la temperatura de superficie es aproximadamente constante. Este comportamiento se observa en superficies saturadas de agua, como cuerpos de agua y zonas de regadío, en las que se utiliza toda la energía disponible para realizar el proceso de evapotranspiración. A medida que aumenta la reflectancia, la temperatura superficial comienza a aumentar hasta cierto punto de inflexión donde la temperatura pasa de ser controlada por un régimen evaporativo a un régimen radiativo. El incremento de la temperatura de superficie se debe a la disminución del proceso evapotranspirativo, producto de una menor disponibilidad de humedad en el suelo. Después de cierto valor umbral de albedo, la temperatura de superficie disminuye con el aumento de la reflectancia, debido a que la humedad en el suelo ha disminuido hasta el punto de que la evapotranspiración no puede efectuarse, por consiguiente, la energía disponible es ocupada exclusivamente para calentar la superficie a través del flujo de calor sensible. El aumento del albedo de superficie produce una disminución de la radiación neta, puesto que una mayor cantidad de energía es reflejada a mayores reflectancias, y por ende, se genera un menor calentamiento de la superficie.

Para un valor de albedo superficial determinado, la variación de temperatura superficial entre las rectas teóricas de temperaturas extremas máximas (T_H) y mínimas (T_{LET}) (líneas punteadas en rojo y azul, respectivamente, en la Figura 21), depende principalmente de la disponibilidad de agua en la superficie terrestre. Por lo tanto, es posible definir un límite seco (T_H) cuando el flujo de calor latente es mínimo ($LET = 0$), que induce al flujo de calor sensible ser máximo e igual a la energía disponible ($H = R_n - G_0$). De forma inversa, se puede fijar un límite húmedo (T_{LET}) cuando el flujo de calor sensible es nulo ($H = 0$), que incita a que el flujo de calor latente sea máximo y equivalente a la energía disponible ($LET = R_n - G_0$). En base a lo expuesto, la fracción evaporativa fue calculada para cada píxel según la Ecuación 12.

$$\Lambda = \frac{T_H - T_s}{T_H - T_{LET}} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde,

- T_H : Temperatura extrema máxima [K]
- T_{LET} : Temperatura extrema mínima [K]
- T_s : Temperatura de superficie [K]

T_H y T_{LET} se obtuvieron de los límites seco y húmedo, correspondientemente, en función del albedo superficial (α_s) y acorde a las siguientes ecuaciones:

$$T_H = a_H \alpha_s + b_H \quad \text{Ec. 13}$$

$$T_{LET} = a_{LET} \alpha_s + b_{LET} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde,

- a_H : Pendiente de la recta superior (límite seco)
- b_H : Intercepto de la recta superior (límite seco)

- a_{LET} : Pendiente de la recta inferior (límite húmedo)
 b_{LET} : Intercepto de la recta inferior (límite húmedo)

Los límites superior seco e inferior húmedo se definieron en función de los píxeles con mayor y menor temperatura superficial del área de estudio, respectivamente, según la metodología utilizada por Roerink *et al.* (2000), modificada por Galleguillos *et al.* (2011a).

Radiación neta (R_n)

La R_n sobre la superficie terrestre es el resultado del balance entre la radiación neta entrante de onda corta y la radiación neta emitida de onda larga. R_n fue estimada de acuerdo a la siguiente ecuación general (Chehbouni *et al.*, 2008; Galleguillos *et al.*, 2011b):

$$R_n = (1 - \alpha_s)R_g + \varepsilon_s(R_a - \sigma T_s^4) \quad \text{Ec. 15}$$

Donde,

- α_s : Albedo de superficie [-]
 R_g : Radiación solar global [W m^{-2}]
 ε_s : Emisividad de superficie [-]
 R_a : Radiación atmosférica [W m^{-2}]
 σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$])
 T_s : Temperatura de superficie [K]

El albedo (α_s) y temperatura de superficie (T_s) se obtuvieron conforme a lo descrito en la sección precedente: Fracción evaporativa.

La radiación solar global o de onda corta incidente (R_g), corresponde al valor instantáneo registrado en el área de estudio al momento de paso del satélite, en este caso, del día 23 de septiembre de 2003 a las 11:00 horas. Como se puede apreciar en el Cuadro 1, no existen mediciones de R_g en las estaciones meteorológicas presentes o cercanas a la cuenca para esta fecha, por consiguiente, se usaron los datos modelados del Explorador Solar extraídos para la ubicación de la estación Las Cardas (Figura 2). Para corroborar las estimaciones de la plataforma, se emplearon los datos de la estación señalada, administrada por el CEAZA-Met, de los días con cielos limpios desde junio a diciembre de 2012. Si bien existen mediciones de R_g para el año 2013, no fueron consideradas, pues el Explorador Solar no dispone de datos para ese período. Los días despejados fueron seleccionados efectuando un análisis de su comportamiento radiativo, escogiendo aquellos que presentaron una curva continua, sin quiebres abruptos (Figura 22). Se realizó una regresión lineal simple entre los datos de R_g de la estación Las Cardas y del Explorador Solar a las 11:00 horas de los días sin nubosidad, para evaluar la calidad de las estimaciones de la plataforma y ajustar a la recta de regresión el valor de R_g del Explorador Solar en el instante que fue adquirida la imagen satelital.

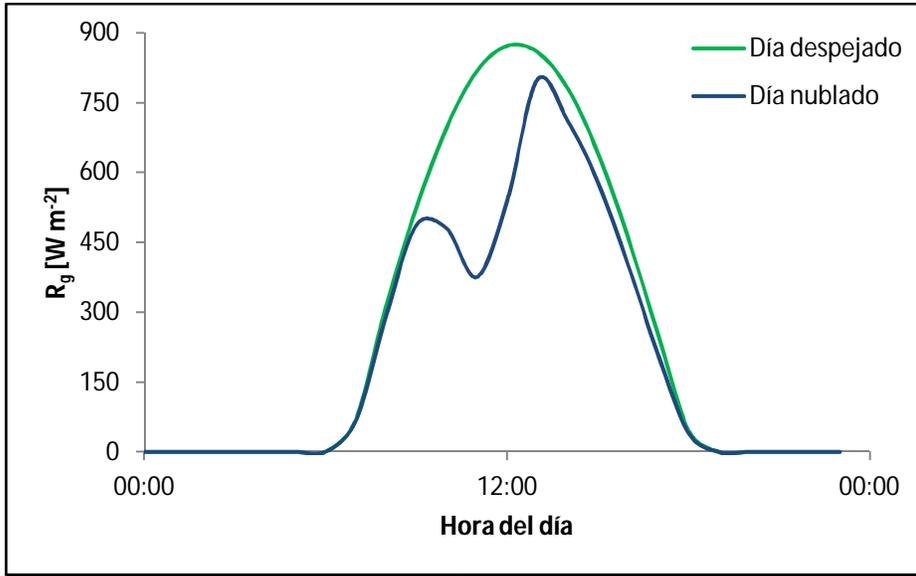


Figura 22. Radiación solar global (R_g) [W m^{-2}] en días despejados y nublados.

La emisividad de superficie (ε_s) se derivó a través de una combinación lineal de las bandas espectrales del canal térmico del sensor ASTER (Ecuación 16), acorde a lo señalado por Ogawa *et al.* (2003).

$$\varepsilon_s = 0,014\varepsilon_{10} + 0,145\varepsilon_{11} + 0,241\varepsilon_{12} + 0,467\varepsilon_{13} + 0,004\varepsilon_{14} + 0,128 \quad \text{Ec. 16}$$

Donde,

ε_i : Banda de emisividad superficial del sensor ASTER ($i = 10 - 14$)

La radiación atmosférica o de onda larga incidente (R_a), fue estimada mediante la formulación propuesta por Brutsaert (1975), expuesta a continuación:

$$R_a = \varepsilon_a \sigma (T_a + 273,15)^4 \quad \text{Ec. 17}$$

Donde,

ε_a : Emisividad atmosférica [-]
 σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$)
 T_a : Temperatura del aire [$^{\circ}\text{C}$]

La emisividad atmosférica, descrita en la Ecuación 17, se calculó a través de una relación empírica en función de la temperatura del aire, de acuerdo a lo descrito por Bastiaanssen *et al.* (1998):

$$\varepsilon_a = 9,2 \times 10^{-6} (T_a + 273,15)^2 \quad \text{Ec. 18}$$

La temperatura del aire (T_a) requerida en las ecuaciones 17 y 18, refiere al valor registrado en el sitio de estudio al instante de paso del satélite. Como se observa en el Cuadro 1, no

existen datos horarios de T_a de la cuenca de Las Cardas para la fecha de adquisición de la escena, sin embargo, se cuenta con mediciones de temperaturas máximas y mínimas diarias de una estación meteorológica cercana (Recoleta Embalse). En base a la información disponible, se evaluaron los métodos reportados por De Wit *et al.* (1978) y Wilkerson *et al.* (1983), para obtener el valor instantáneo de T_a a las 11:00 horas de la estación Recoleta a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias.

El modelo propuesto por De Wit *et al.* (1978), estima la temperatura del aire instantánea dividiendo el día en dos segmentos: a) desde la salida del sol hasta la hora de máxima temperatura y, b) desde la hora de máxima temperatura hasta la salida del sol del día siguiente. Para el primer segmento, de interés en la presente investigación, la modelación de temperatura se realizó conforme a la Ecuación 19.

$$T_{de\ Wit}(H) = \frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} - \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}{2} \left[\cos \left(\pi \frac{H - H_0}{H_{Tm\acute{a}x} - H_0} \right) \right] \quad \text{Ec. 19}$$

Donde,

- $T_{de\ Wit}$: Temperatura modelada por el método De Wit [°C]
- $T_{m\acute{a}x}$: Temperatura máxima diaria [°C]
- $T_{m\acute{i}n}$: Temperatura mínima diaria [°C]
- H : Hora del día a la que se calcula la temperatura [h]
- H_0 : Hora de salida del sol [h]
- $H_{Tm\acute{a}x}$: Hora de máxima temperatura (14,0 [h])

El modelo descrito por Wilkerson *et al.* (1983), a diferencia del anterior, divide el día en tres segmentos: a) desde la medianoche hasta la salida del sol, b) para las horas del día y, c) desde la puesta de sol hasta la medianoche. Para el segundo segmento, el método estima la temperatura según la Ecuación 20.

$$T_{Wilkerson}(H) = T_{m\acute{i}n} + (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \left[\text{sen} \left(\pi \frac{H - H_0}{H_1 - H_0} \right) \right] \quad \text{Ec. 20}$$

Donde,

- $T_{Wilkerson}$: Temperatura modelada por el método Wilkerson [°C]
- H_1 : Hora de puesta de sol [h]

Los horarios de salida y puesta de sol, H_0 y H_1 , respectivamente, se obtuvieron desde el sitio web “Time and Date AS”¹³.

Para extrapolar la información de la estación Recoleta al lugar de estudio, se usaron las mediciones de T_a del sistema “Bowen-ratio” (Figura 2), desde febrero de 2008 a diciembre de 2010, de los días en que ambas localidades simultáneamente se encontraron sin nubosidad. Los días con cielos limpios se seleccionaron observando su comportamiento

¹³ <http://www.timeanddate.com/>

radiativo (Figura 22), a través de los datos de R_n registrados por el sistema “Bowen-ratio”, en el caso de Las Cardas, y los datos de R_g modelados por el Explorador Solar para la estación Recoleta. Escogidos estos días, se efectuó una regresión lineal simple entre la T_a modelada por los métodos De Wit y Wilkerson de la estación Recoleta a las 11:00 horas, y la T_a registrada, en ese mismo instante, por el sistema “Bowen-ratio”. Ambas regresiones permitieron obtener el dato meteorológico a las 11:00 horas del lugar de estudio del día 23 de septiembre de 2003.

Para comparar la exactitud de los métodos aplicados, se evaluaron los parámetros estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrado medio (RMSE) y error relativo cuadrado medio (RRMSE).

Coefficiente de la razón entre la radiación neta diaria e instantánea (C_{di})

C_{di} indica la relación entre la radiación neta diaria e instantánea (Ecuación 21), permitiendo extrapolar la R_n estimada al instante de paso del satélite a valores diarios.

$$C_{di} = \frac{R_{nd}}{R_{ni}} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde,

- R_{nd} : Radiación neta diaria [W m^{-2}]
- R_{ni} : Radiación neta instantánea [W m^{-2}]

C_{di} fue calculado de acuerdo a lo señalado por Sobrino *et al.* (2007), ajustando una curva polinómica de segundo orden a la relación entre este coeficiente, estimado según la Ecuación 21 a las 11:00 horas, y el día del año. Se utilizaron mediciones de R_n del sistema “Bowen-ratio”, horarias y diarias, de aquellos días despejados del período comprendido entre los años 2008 y 2010.

Apéndice II. Caracterización de los sitios de muestreo

Cuadro 13. Caracterización de los sitios de muestreo de acuerdo a variables espaciales.

Sitio de muestreo	ET _r [mm d ⁻¹]	SAVI [-]	MrVBF [-]	Altitud [m.s.n.m.]	Exposición [°]	Pendiente [%]
1	0,650	0,167	0,091	342,333	30,514 (NE)	26,959
2	0,325	0,186	0,002	364,111	57,721 (NE)	34,589
3	0,847	0,143	0,001	414,889	16,299 (N)	23,040
4	0,968	0,200	0,001	372,889	59,141 (NE)	29,033
5	1,169	0,237	0,000	422,889	111,711 (E)	34,334
6	0,895	0,216	0,005	413,667	65,542 (NE)	31,160
7	1,735	0,168	0,617	377,111	311,013 (NO)	7,219
8	1,787	0,157	0,122	318,889	248,963 (O)	7,738
9	1,779	0,149	0,127	401,778	339,499 (N)	18,947
10	2,140	0,197	2,979	274,556	85,732 (E)	2,074
11	1,733	0,186	1,341	352,111	280,890 (O)	7,433
12	1,382	0,194	2,032	284,000	175,815 (S)	3,172
13	2,037	0,207	0,673	407,111	342,664 (N)	8,649
14	2,035	0,182	0,282	395,111	299,716 (NO)	15,068
15	2,315	0,186	0,554	332,333	293,944 (NO)	4,981
16	2,218	0,156	0,002	487,444	301,236 (NO)	26,694
17	2,319	0,163	0,002	452,111	282,365 (O)	24,646
18	2,439	0,174	0,034	413,333	251,264 (O)	24,166
19	3,291	0,204	0,000	606,444	228,494 (SO)	41,893
20	3,383	0,149	0,000	582,556	294,674 (NO)	28,650
21	3,665	0,142	0,000	594,111	260,187 (O)	37,305
22	2,032	0,263	0,000	440,333	121,811 (SE)	37,591
23	2,270	0,248	0,002	564,667	123,101 (SE)	24,556
24	2,180	0,228	0,006	510,778	24,201 (NE)	19,914
25	2,594	0,221	0,000	370,333	155,845 (SE)	35,450
26	3,092	0,209	0,000	464,556	282,343 (O)	31,547
27	3,032	0,200	0,000	448,333	282,253 (O)	39,338
28	3,464	0,297	0,562	338,333	143,248 (SE)	8,975
29	3,487	0,320	0,000	707,222	140,544 (SE)	40,214
30	3,910	0,260	0,000	552,889	212,923 (SO)	28,790

Apéndice III. Análisis espacio-temporal del vigor vegetal

La comparación entre los índices de vegetación SAVI del 23 de septiembre de 2003 y 29 de septiembre de 2011 en los sitios de muestreo se presenta en la siguiente figura:

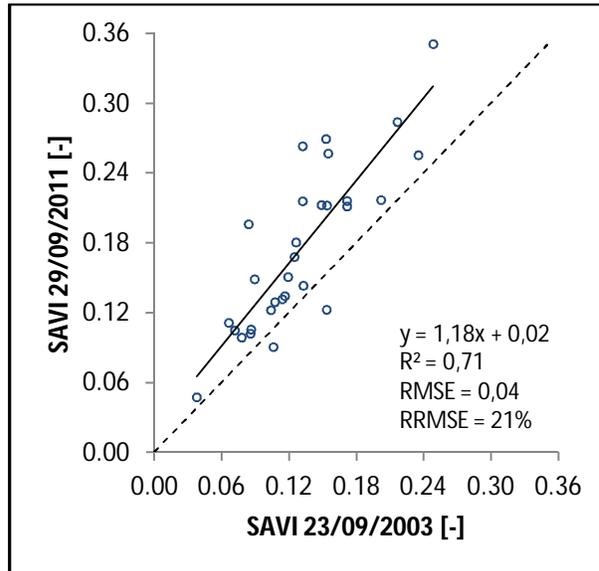


Figura 23. Diagrama de dispersión entre los índices de vegetación SAVI [-] del 23 de septiembre de 2003 y 29 de septiembre de 2011 en cada sitio de muestreo.

Como se puede apreciar en la Figura 23, la nube de puntos muestra una asociación lineal positiva entre los valores del índice de vegetación SAVI del año 2003 y los del año 2011 ($R^2 = 0,71$; $p < 0,001$), indicando que no existen cambios sustanciales en el tiempo del vigor vegetal en los sitios de muestreo.

Adicionalmente, la pendiente de la recta deja en evidencia mayores valores del índice el año 2011, al compararlos con los del año 2003. Cuando no existen intervenciones antrópicas considerables en el lugar de estudio, las variaciones temporales del índice de vegetación se deben, en gran medida, a las condiciones de humedad del suelo (Vicente-Serrano *et al.*, 2005), que a su vez dependen de las precipitaciones. El registro pluviométrico mensual de la cuenca de Las Cardas (Anexo I) muestra que la precipitación acumulada al mes de septiembre el año 2003 fue de 123,25 [mm], muy por debajo de lo acumulado a la misma fecha el año 2011 (251,70 [mm]). Cabe señalar que antes del mes de septiembre en los años 2003 y 2011, la última precipitación fue registrada durante el mes de julio, lo que genera condiciones similares de acumulación de agua en el suelo en los dos años mencionados, minimizando las diferencias en términos de balance hídrico para ambos períodos de septiembre. Lo anterior podría explicar que los valores del índice de vegetación SAVI del año 2011 sean mayores a los del año 2003.

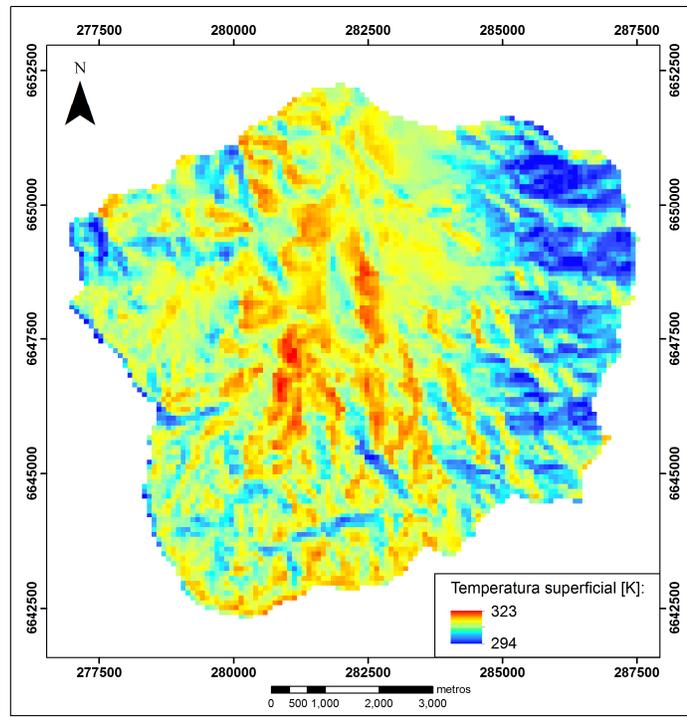
Apéndice IV. Variables de entrada superficiales auxiliares del algoritmo S-SEBI

Figura 24. Distribución espacial de la temperatura de superficie [K].

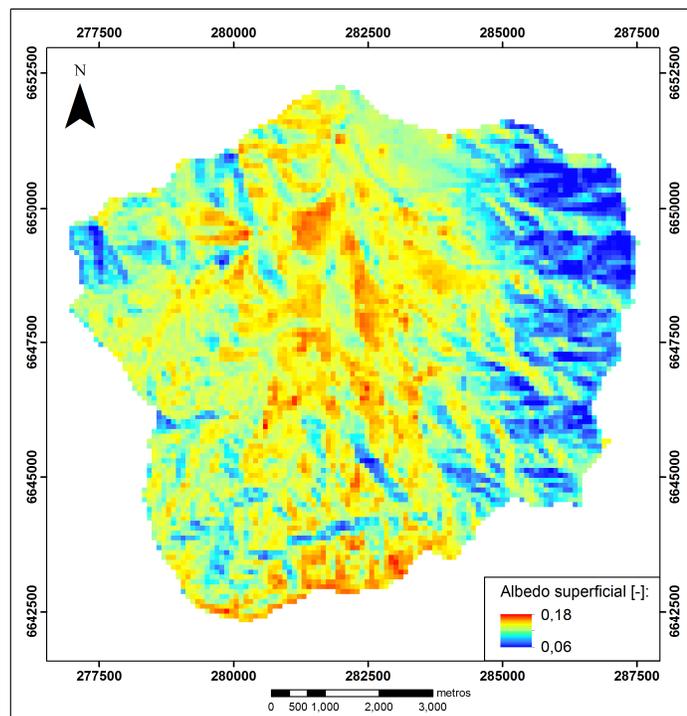


Figura 25. Distribución espacial del albedo de superficie [-].

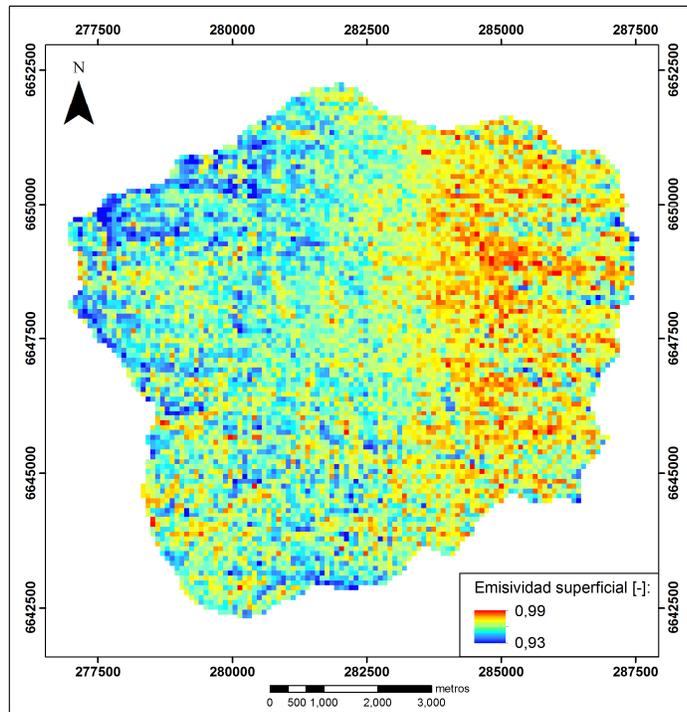


Figura 26. Distribución espacial de la emisividad superficial [-].

Apéndice V. Caracterización florística de leñosas y suculentas identificadas en la cuenca de Las Cardas

Cuadro 14. Listado florístico de leñosas y suculentas identificadas en la cuenca de Las Cardas.

Familia	Género	Especie	Nombre común
Anacardiaceae R. Br.	<i>Lithraea</i> Miers	<i>Lithraea caustica</i> (Molina) Hook. & Arn.	Litre
Anacardiaceae R. Br.	<i>Schinus</i> L.	<i>Schinus molle</i> L.	Pimientó
Anacardiaceae R. Br.	<i>Schinus</i> L.	<i>Schinus polygamus</i> (Cav.) Cabrera	Huingán
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Baccharis</i> L.	<i>Baccharis linearis</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	Romerillo
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Baccharis</i> L.	<i>Baccharis paniculata</i> DC.	Chilca; Culpio
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Baccharis</i> L.	<i>Baccharis salicifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	Chilca
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Bahia</i> Lag.	<i>Bahia ambrosioides</i> Lag.	Chamiza
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Centaurea</i> L.	<i>Centaurea chilensis</i> Hook. & Arn.	Flor del minero
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Centaurea</i> L.	<i>Centaurea</i> sp.	
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Chuquiraga</i> Juss.	<i>Chuquiraga ulicina</i> (Hook. & Arn.) Hook. & Arn. subsp. <i>acicularis</i> (D. Don) C. Ezcurra	Hierba blanca
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Conyza</i> Less.	<i>Conyza</i> sp.	
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Eupatorium</i> L.	<i>Eupatorium salvia</i> Colla	Pegajosa
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Flourensia</i> DC.	<i>Flourensia thurifera</i> DC.	Incienso; Maravilla del campo
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Gutierrezia</i> Lag.	<i>Gutierrezia resinosa</i> (Hook. & Arn.) S.F. Blake	Pichanilla
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Haplopappus</i> Cass.	<i>Haplopappus cerberoanus</i> Reiche	Cuerno de cabra; Crespilla
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Haplopappus</i> Cass.	<i>Haplopappus</i> sp.	
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Ophryosporus</i> Meyen	<i>Ophryosporus paradoxus</i> (Hook. & Arn.) Benth. & Hook. ex Hook. f. & Jackson	Rabo de zorra
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Pleocarpus</i> D. Don	<i>Pleocarpus revolutus</i> D. Don	Cola de ratón
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Podanthus</i> Lag.	<i>Podanthus mitiqui</i> Lindl.	Mitique
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Proustia</i> Lag.	<i>Proustia cuneifolia</i> D. Don	Huañil
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Senecio</i> L.	<i>Senecio hakeifolius</i> Bertero ex DC. var. <i>hakeifolius</i>	
Asteraceae Bercht. & J. Presl	<i>Senecio</i> L.	<i>Senecio murorum</i> Remy	
Berberidaceae Juss.	<i>Berberis</i> L.	<i>Berberis glomerata</i> Hook. & Arn.	
Boraginaceae Juss.	<i>Cordia</i> L.	<i>Cordia decandra</i> Hook. & Arn.	Carbonillo
Boraginaceae Juss.	<i>Heliotropium</i> L.	<i>Heliotropium stenophyllum</i> Hook. & Arn.	Palo negro
Bromeliaceae Juss.	<i>Puya</i> Molina	<i>Puya berteroniana</i> Mez	Chagual

(continúa)

Cuadro 14. (continuación).

Familia	Género	Especie	Nombre común
Cactaceae Juss.	<i>Copiapoa</i> Britton & Rose	<i>Copiapoa coquimbana</i> (Karw.) Britton & Rose var. <i>coquimbana</i>	Coquimbano
Cactaceae Juss.	<i>Cumulopuntia</i> F. Ritter	<i>Cumulopuntia sphaerica</i> (Foerster) E.F. Anderson	Perrito; Gatito
Cactaceae Juss.	<i>Eulychnia</i> Phil.	<i>Eulychnia acida</i> Phil.	Copao
Calceolariaceae Olmstead	<i>Calceolaria</i> L.	<i>Calceolaria collina</i> Phil.	Topa-topa
Campanulaceae Juss.	<i>Lobelia</i> L.	<i>Lobelia polyphylla</i> Hook. & Arn.	Tupa; Tabaco del diablo
Caricaceae Dumort.	<i>Vasconcellea</i> A. St.-Hil.	<i>Vasconcellea chilensis</i> Planch. ex A. DC.	Papayo silvestre
Celastraceae R. Br.	<i>Maytenus</i> Molina	<i>Maytenus boaria</i> Molina	Maitén
Ephedraceae Dumort.	<i>Ephedra</i> L.	<i>Ephedra chilensis</i> C. Presl	Pingo-pingo
Escalloniaceae R. Br. ex Dumort.	<i>Escallonia</i> Mutis ex L. f.	<i>Escallonia illinita</i> C. Presl	Barraco
Euphorbiaceae Juss.	<i>Chiropetalum</i> A. Juss.	<i>Chiropetalum berterianum</i> Schtdl.	
Euphorbiaceae Juss.	<i>Colliguaja</i> Molina	<i>Colliguaja odorifera</i> Molina	Colliguay
Fabaceae Lindl.	<i>Acacia</i> Mill.	<i>Acacia caven</i> (Molina) Molina	Espino
Fabaceae Lindl.	<i>Adesmia</i> DC.	<i>Adesmia bedwellii</i> Skottsb.	Varilla brava
Fabaceae Lindl.	<i>Caesalpinia</i> L.	<i>Caesalpinia angulata</i> (Hook. & Arn.) Baill.	Retamilla
Fabaceae Lindl.	<i>Senna</i> Mill.	<i>Senna cumingii</i> (Hook. & Arn.) H.S. Irwin & Barneby var. <i>coquimbensis</i> (Vogel) H.S. Irwin & Barneby	Alcaparra
Lamiaceae Martinov	<i>Lepechinia</i> Willd.	<i>Lepechinia salviae</i> (Lindl.) Epling	Salvia blanca
Myrtaceae Juss.	<i>Eucalyptus</i> L'Hér.	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	Eucaliptus
Myrtaceae Juss.	<i>Luma</i> A. Gray	<i>Luma chequen</i> (Molina) A. Gray	Chequén; Arrayán
Onagraceae Juss.	<i>Fuchsia</i> L.	<i>Fuchsia lycioides</i> Andrews	Palo de yegua
Oxalidaceae R. Br.	<i>Oxalis</i> L.	<i>Oxalis gigantea</i> Barnéoud	Churqui
Phytolaccaeae R. Br.	<i>Anisomeria</i> D. Don	<i>Anisomeria littoralis</i> (Poepp. & Endl.) Moq.	Pircún
Polygonaceae Juss.	<i>Muehlenbeckia</i> Meisn.	<i>Muehlenbeckia hastulata</i> (Sm.) I.M. Johnst.	Quilo
Rhamnaceae Juss.	<i>Colletia</i> Comm. ex Juss.	<i>Colletia hystrix</i> Clos	Crucero; Cunco
Rosaceae Juss.	<i>Kageneckia</i> Ruiz & Pav.	<i>Kageneckia oblonga</i> Ruiz & Pav.	Bollén
Salicaceae Mirb.	<i>Azara</i> Ruiz & Pav.	<i>Azara celastrina</i> D. Don	Lilén
Sapindaceae Juss.	<i>Bridgesia</i> Bertero ex Cambess.	<i>Bridgesia incisifolia</i> Bertero ex Cambess.	Bridgesia; Rumpiato
Sapindaceae Juss.	<i>Llagunoa</i> Ruiz & Pav.	<i>Llagunoa glandulosa</i> G. Don	Atutemo
Solanaceae Juss.	<i>Cestrum</i> L.	<i>Cestrum parqui</i> L'Hér.	Palqui
Solanaceae Juss.	<i>Fabiana</i> Ruiz & Pav.	<i>Fabiana viscosa</i> Hook. & Arn.	
Solanaceae Juss.	<i>Solanum</i> L.	<i>Solanum pinnatum</i> Cav.	Tomatillo
Verbenaceae J. St.-Hil.	<i>Junellia</i> Moldenke	<i>Junellia selaginoides</i> (Kunth ex Walp.) Moldenke	
Zygophyllaceae R. Br.	<i>Porlieria</i> Ruiz & Pav.	<i>Porlieria chilensis</i> I.M. Johnst.	Guayacán; Palo santo

Cuadro 15. Atributos de especies leñosas y suculentas identificadas en la cuenca de Las Cardas.

Tipo biológico	Especie	Origen geográfico	Endemismo a nivel nacional
Arbóreo			
	<i>Acacia caven</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Azara celastrina</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Cordia decandra</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Eucalyptus globulus</i>	Alóctono	
	<i>Kageneckia oblonga</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Lithraea caustica</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Luma chequen</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Maytenus boaria</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Porlieria chilensis</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Schinus molle</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Schinus polygamus</i>	Autóctono	No endémico
Arbustivo			
	<i>Adesmia bedwellii</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Anisomeria littoralis</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Baccharis linearis</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Baccharis paniculata</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Baccharis salicifolia</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Bahia ambrosioides</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Berberis glomerata</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Bridgesia incisifolia</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Caesalpinia angulata</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Calceolaria collina</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Centaurea chilensis</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Centaurea sp.</i>		
	<i>Cestrum parqui</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Chiropetalum berterianum</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Chuquiraga ulicina</i> subsp. <i>acicularis</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Colletia hystrix</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Colliguaja odorifera</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Conyza sp.</i>		
	<i>Ephedra chilensis</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Escallonia illinita</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Eupatorium salvia</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Fabiana viscosa</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Flourensia thurifera</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Fuchsia lycioides</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Gutierrezia resinosa</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Haplopappus cerberoanus</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Haplopappus sp.</i>		
	<i>Heliotropium stenophyllum</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Junellia selaginoides</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Lepechinia salviae</i>	Autóctono	Endémico

(continúa)

Cuadro 15. (continuación).

Tipo biológico	Especie	Origen geográfico	Endemismo a nivel nacional
Arbustivo			
	<i>Llagunoa glandulosa</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Lobelia polyphylla</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Muehlenbeckia hastulata</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Ophryosporus paradoxus</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Oxalis gigantea</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Pleocarpus revolutus</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Podanthus mitiqui</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Proustia cuneifolia</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Senecio hakeifolius</i> var. <i>hakeifolius</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Senecio murorum</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Senna cumingii</i> var. <i>coquimbensis</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Solanum pinnatum</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Vasconcellea chilensis</i>	Autóctono	Endémico
Suculento			
	<i>Copiapoa coquimbana</i> var. <i>coquimbana</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Cumulopuntia sphaerica</i>	Autóctono	No endémico
	<i>Eulychnia acida</i>	Autóctono	Endémico
	<i>Puya berteroniana</i>	Autóctono	Endémico

Apéndice VI. Estadística descriptiva de los atributos estructurales de especies leñosas y suculentas

Cuadro 16. Parámetros estadísticos de los atributos estructurales de especies leñosas y suculentas.

Tipo biológico	Especie	Cobertura				Altura media del follaje			
		Mínimo	Máximo	Media	D.E.	Mínimo	Máximo	Media	D.E.
			[%]				[m]		
Arbóreo									
	<i>Acacia caven</i>	0,00	8,20	0,27	1,50	0,00	2,70	0,09	0,49
	<i>Azara celsastrina</i>	0,00	16,00	0,53	2,92	0,00	2,00	0,07	0,37
	<i>Cordia decandra</i>	0,00	34,00	2,15	6,77	0,00	0,84	0,08	0,21
	<i>Eucalyptus globulus</i>	0,00	2,30	0,08	0,42	0,00	0,67	0,02	0,12
	<i>Kageneckia oblonga</i>	0,00	7,70	0,38	1,49	0,00	1,90	0,13	0,45
	<i>Lithraea caustica</i>	0,00	34,00	1,56	6,26	0,00	2,17	0,14	0,42
	<i>Luma chequen</i>	0,00	7,00	0,23	1,28	0,00	1,55	0,05	0,28
	<i>Maytenus boaria</i>	0,00	23,10	0,77	4,22	0,00	2,10	0,07	0,38
	<i>Schinus polygamus</i>	0,00	1,40	0,06	0,26	0,00	0,45	0,03	0,11
Arbustivo									
	<i>Adesmia bedwellii</i>	0,00	17,30	1,56	3,71	0,00	0,53	0,12	0,18
	<i>Anisomeria littoralis</i>	0,00	0,70	0,04	0,15	0,00	0,35	0,02	0,07
	<i>Baccharis linearis</i>	0,00	3,33	0,36	0,88	0,00	1,50	0,12	0,30
	<i>Baccharis paniculata</i>	0,00	19,90	2,17	5,41	0,00	0,48	0,09	0,16
	<i>Bahia ambrosioides</i>	0,00	4,80	0,45	1,06	0,00	0,50	0,07	0,13
	<i>Berberis glomerata</i>	0,00	0,90	0,05	0,20	0,00	0,35	0,02	0,07
	<i>Bridgesia incisifolia</i>	0,00	7,30	0,64	1,54	0,00	0,33	0,05	0,09
	<i>Calceolaria collina</i>	0,00	3,20	0,14	0,59	0,00	0,50	0,04	0,12
	<i>Centaurea chilensis</i>	0,00	5,30	0,35	1,24	0,00	0,55	0,04	0,14
	<i>Centaurea sp.</i>	0,00	1,30	0,04	0,24	0,00	0,50	0,02	0,09
	<i>Cestrum parqui</i>	0,00	31,10	1,13	5,68	0,00	1,24	0,07	0,26
	<i>Chiropetalum berterianum</i>	0,00	0,60	0,02	0,11	0,00	0,15	0,01	0,03
	<i>Chuquiraga ulicina</i> subsp. <i>acicularis</i>	0,00	3,10	0,10	0,57	0,00	0,20	0,01	0,04
	<i>Colletia hystrix</i>	0,00	0,50	0,02	0,09	0,00	0,40	0,01	0,07

(continúa)

Cuadro 16. (continuación).

Tipo biológico	Especie	Cobertura				Altura media del follaje			
		Mínimo	Máximo	Media	D.E.	Mínimo	Máximo	Media	D.E.
		[%]				[m]			
Arbustivo									
	<i>Ephedra chilensis</i>	0,00	1,20	0,10	0,26	0,00	0,20	0,04	0,07
	<i>Escallonia illinita</i>	0,00	5,00	0,17	0,91	0,00	2,00	0,07	0,37
	<i>Eupatorium salvia</i>	0,00	1,00	0,03	0,18	0,00	0,80	0,03	0,15
	<i>Fabiana viscosa</i>	0,00	5,90	0,20	1,08	0,00	0,66	0,02	0,12
	<i>Flourensia thurifera</i>	0,00	30,90	8,44	9,40	0,00	0,40	0,16	0,12
	<i>Fuchsia lycioides</i>	0,00	4,90	0,28	1,03	0,00	1,20	0,07	0,25
	<i>Gutierrezia resinosa</i>	0,00	16,30	2,87	4,17	0,00	0,36	0,15	0,12
	<i>Haplopappus cerberoaenus</i>	0,00	14,85	1,25	3,28	0,00	0,50	0,07	0,12
	<i>Heliotropium stenophyllum</i>	0,00	13,00	1,86	3,55	0,00	0,73	0,14	0,22
	<i>Junellia selaginoides</i>	0,00	0,10	0,00	0,02	0,00	0,15	0,01	0,03
	<i>Lepechinia salviae</i>	0,00	3,20	0,17	0,67	0,00	0,70	0,04	0,14
	<i>Llagunoa glandulosa</i>	0,00	4,10	0,21	0,79	0,00	0,80	0,05	0,17
	<i>Lobelia polyphylla</i>	0,00	0,60	0,02	0,11	0,00	0,30	0,01	0,05
	<i>Muehlenbeckia hastulata</i>	0,00	0,80	0,03	0,15	0,00	0,15	0,01	0,03
	<i>Ophryosporus paradoxus</i>	0,00	1,80	0,06	0,33	0,00	0,40	0,01	0,07
	<i>Oxalis gigantea</i>	0,00	1,50	0,12	0,35	0,00	0,45	0,04	0,11
	<i>Pleocarpus revolutus</i>	0,00	1,70	0,06	0,31	0,00	0,70	0,02	0,13
	<i>Podanthus mitiqui</i>	0,00	15,90	0,53	2,90	0,00	0,50	0,02	0,09
	<i>Proustia cuneifolia</i>	0,00	4,90	0,24	0,93	0,00	0,50	0,03	0,12
	<i>Senna cumingii</i> var. <i>coquimbensis</i>	0,00	8,50	0,61	1,62	0,00	0,70	0,12	0,21
	<i>Solanum pinnatum</i>	0,00	48,30	1,94	8,82	0,00	0,51	0,09	0,18
	<i>Vasconcellea chilensis</i>	0,00	0,80	0,03	0,15	0,00	0,10	0,00	0,02
Suculento									
	<i>Copiapoa coquimbana</i> var. <i>coquimbana</i>	0,00	1,40	0,05	0,26	0,00	0,25	0,01	0,05
	<i>Eulychnia acida</i>	0,00	5,20	0,47	1,07	0,00	2,20	0,24	0,54
	<i>Puya berteroniana</i>	0,00	7,70	0,59	1,84	0,00	1,00	0,08	0,25

Nota: Número de observaciones = 30.

Apéndice VII. Matriz presencia/ausencia de especies leñosas y suculentas en cada sitio de muestreo

Cuadro 17. Matriz presencia (1) / ausencia (0) de especies leñosas y suculentas en cada sitio de muestreo.

Especie	Sitios de muestreo																																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
<i>Acacia caven</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
<i>Adesmia bedwellii</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	10	
<i>Anisomeria littoralis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2		
<i>Azara celastrina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1		
<i>Baccharis linearis</i>	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	8	
<i>Baccharis paniculata</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	8	
<i>Bahia ambrosioides</i>	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	9	
<i>Berberis glomerata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	
<i>Bridgesia incisifolia</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	8	
<i>Calceolaria collina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	3	
<i>Centaurea chilensis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	3	
<i>Centaurea sp.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
<i>Cestrum parqui</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	
<i>Chiropetalum berterianum</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Chuquiraga ulicina</i> subsp. <i>acicularis</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Colletia hystrix</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
<i>Copiapoa coquimbana</i> var. <i>coquimbana</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Cordia decandra</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	5	
<i>Ephedra chilensis</i>	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
<i>Escallonia illinita</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
<i>Eucalyptus globulus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Eulychnia acida</i>	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	8	
<i>Eupatorium salvia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
<i>Fabiana viscosa</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

(continúa)

Cuadro 17. (continuación).

Especie	Sitios de muestreo																																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
<i>Flourensia thurifera</i>	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	22		
<i>Fuchsia lycioides</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	4		
<i>Gutierrezia resinosa</i>	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	22		
<i>Haplopappus cerberoanus</i>	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11		
<i>Heliotropium stenophyllum</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	10		
<i>Junellia selaginoides</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
<i>Kageneckia oblonga</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	3		
<i>Lepechinia salviae</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2		
<i>Lithraea caustica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5	
<i>Llagunoa glandulosa</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	3		
<i>Lobelia polyphylla</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
<i>Luma chequen</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
<i>Maytenus boaria</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
<i>Muehlenbeckia hastulata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Ophryosporus paradoxus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
<i>Oxalis gigantea</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	
<i>Pleocarphus revolutus</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
<i>Podanthus mitiqui</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
<i>Proustia cuneifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	
<i>Puya berteroniana</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
<i>Schinus polygamus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	
<i>Senna cumingii</i> var. <i>coquimbensis</i>	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	11	
<i>Solanum pinnatum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	7		
<i>Vasconcellea chilensis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Total	5	4	7	5	6	8	6	2	5	8	6	10	4	5	4	9	10	7	12	9	5	7	7	9	8	5	6	9	10	10			

Apéndice VIII. Variables vegetacionales por tipo biológico en cada sitio de muestreo

Riqueza

La riqueza total por sitio de muestreo, contemplando especies leñosas y suculentas, se exhibe en la Figura 27. De acuerdo a esta figura, se observa que las especies arbustivas son dominantes en el área de estudio al estar presentes en todos los sitios muestreados. Éstas, junto con las suculentas, representan formas de vida peculiares de los ambientes áridos y semiáridos (Armesto *et al.*, 1993). Por lo mismo, las arbóreas tienen baja presencia, con máximo una o dos especies por sitio, a excepción del bosque de Caiceo, en el que se registran 5 especies (sitio de muestreo 28). Este lugar es de gran importancia dentro de la cuenca, pues Squeo *et al.* (2001) lo distinguen como un posible sitio de interés para la conservación de la diversidad vegetal en la Región de Coquimbo, por encontrarse actualmente muy alterado, con extracción de tierra de hoja y poseer un bosque centenario de *Lithraea caustica*.

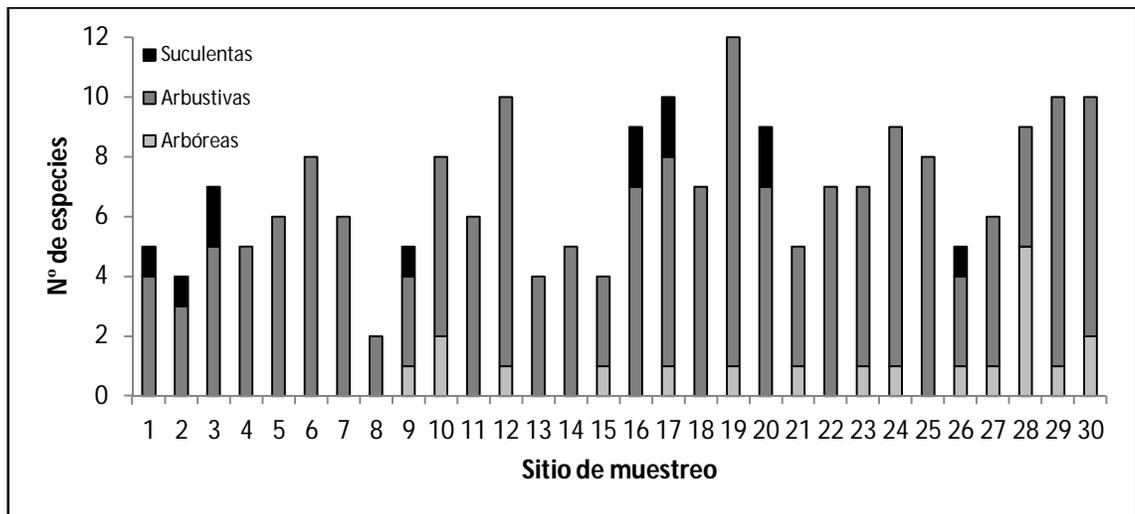


Figura 27. Riqueza de especies por tipos biológicos en cada sitio de muestreo.

La riqueza a nivel de géneros (Figura 28) presenta valores similares a la riqueza específica total (Figura 27), pese a encontrarse taxonómicamente en un nivel mayor. Esto se debe a que dos, de los 46 géneros identificados, están constituidos por más de una especie (*Baccharis* y *Centaurea*), provocando diferencias de sólo un registro en los sitios 7 y 10. Lo anterior, no se manifiesta con la riqueza a nivel de familias, donde las discrepancias son mayores pero con tendencias espaciales parecidas (Figura 28).

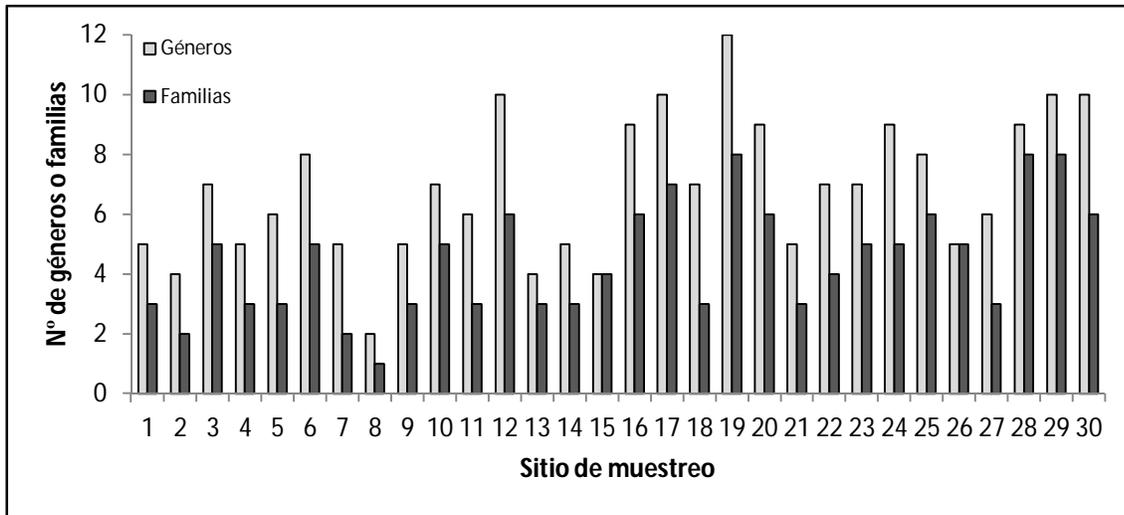


Figura 28. Riqueza de géneros y familias en cada sitio de muestreo.

Diversidad de especies

La diversidad de especies leñosas y suculentas por sitio de muestreo, determinada mediante el índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'), se presenta en la Figura 29.

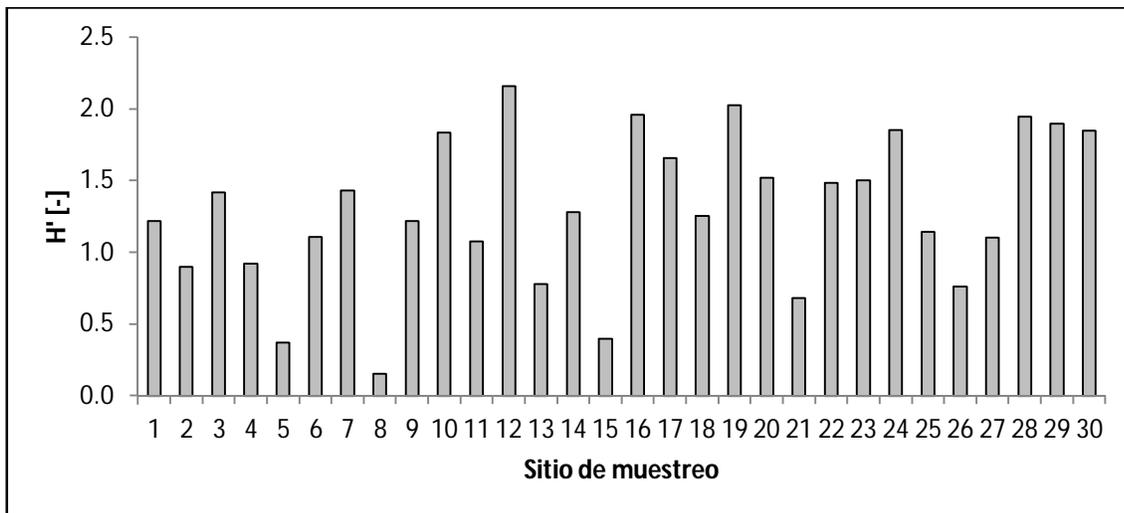


Figura 29. Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') de especies leñosas y suculentas en cada sitio de muestreo.

Según la figura precedente, el menor registro del índice se identifica en el sitio 8 (0,15 [-]) y el mayor en el sitio 12 (2,16 [-]). Al comparar estos valores con la riqueza específica total (Figura 27), se pueden apreciar algunos contrastes en la tendencia de los datos, debido a que el índice de diversidad de Shannon-Wiener considera, además del número de especies de cada unidad de muestreo, su proporción, siendo mayor cuanto más equitativa sea ésta.

Cobertura

La estructura horizontal por tipos biológicos en cada sitio de muestreo se expone en la Figura 30. Acorde a esta figura, se evidencia una superposición de estratos, puesto que se sobrepasa el 100% de cobertura en algunos sitios. Adicionalmente, la cobertura total por sitio de muestreo se exhibe en la Figura 31. Esta figura, junto con la Figura 30, revelan la alta variabilidad espacial de la vegetación, particular de zonas áridas y semiáridas (Aguiar y Sala, 1999).

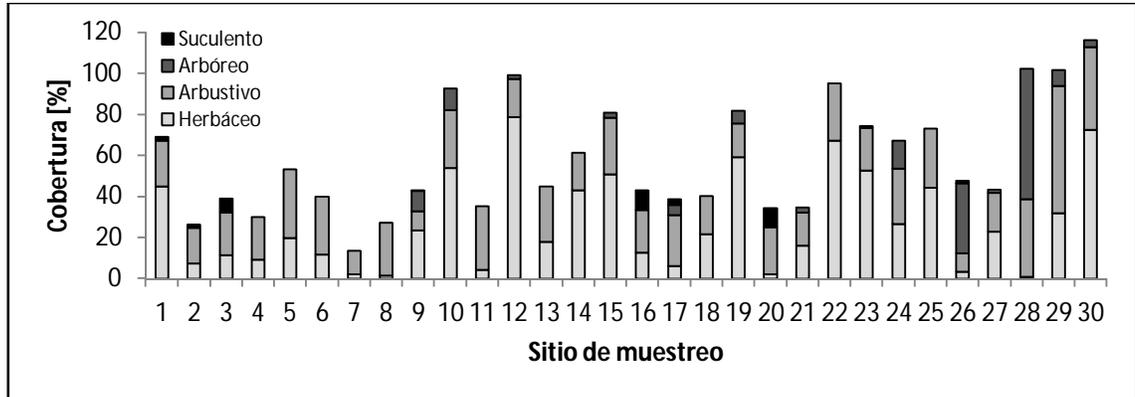


Figura 30. Cobertura por tipos biológicos en cada sitio de muestreo.

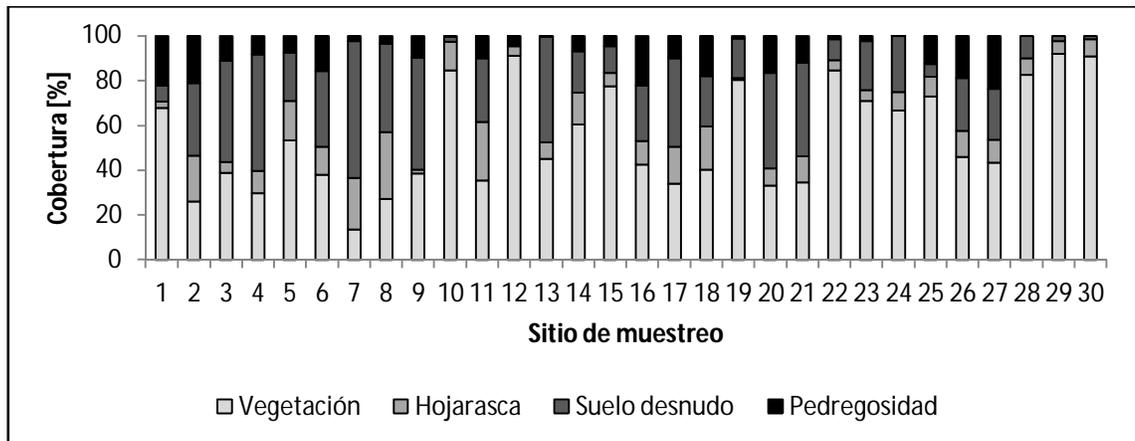


Figura 31. Cobertura total en cada sitio de muestreo.

Altura media del follaje

La estructura vertical por tipos biológicos en cada sitio de muestreo se presenta en la Figura 32. La altura media del follaje de especies arbustivas (Figura 32.b) es bastante homogénea, exceptuando el bosque de Caiceo (sitio de muestreo 28), donde las especies registran una altura media de 1,28 [m], valor muy alejado del resto de los sitios, que no superan los 0,50 [m]. Al contrario, la altura media del follaje de los tipos biológicos herbáceo (Figura 32.a) y arbóreo (Figura 32.c) y suculento (Figura 32.d), muestran cierta heterogeneidad espacial.

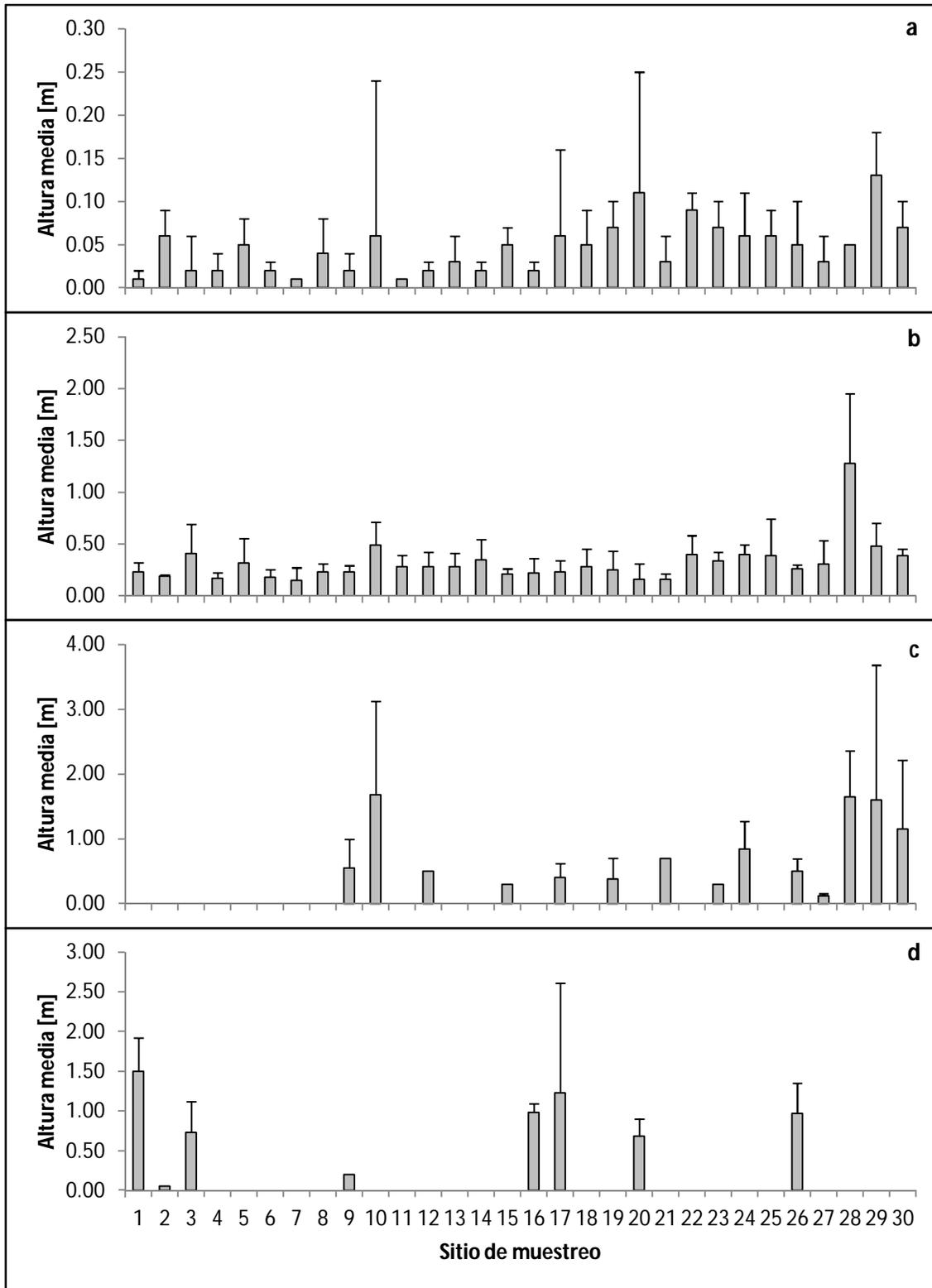


Figura 32. Altura media del follaje (\pm D.E.) de los tipos biológicos: herbáceo (a), arbustivo (b), arbóreo (c) y suculento (d), en cada sitio de muestreo.

Fitovolumen

El fitovolumen total por sitio de muestreo se expone en la Figura 33. Esta figura muestra que en la mayoría de los sitios el fitovolumen total es inferior a $3.000 \text{ [m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{]}$ aproximadamente, a excepción de un par de sitios que escapan excesivamente del promedio.

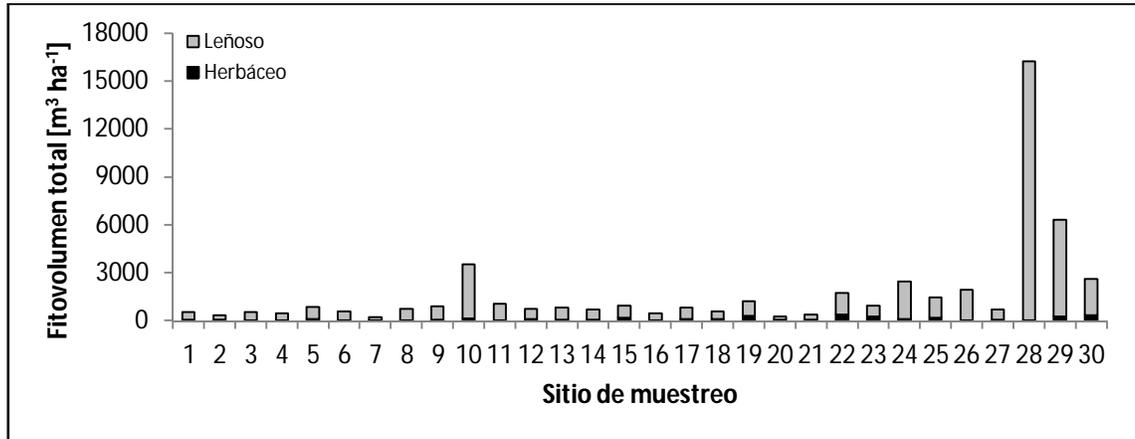


Figura 33. Fitovolumen total ajustado en cada sitio de muestreo.