

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EFICIENCIA DE USO DEL AGUA EN EL MATORRAL ÁRIDO COSTERO DE  
LA REGIÓN DE COQUIMBO A ESCALA FOLIAR Y ECOSISTÉMICA**

**PÍA M.S. JARA TORRES**

SANTIAGO, CHILE  
2011



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**EFICIENCIA DE USO DEL AGUA EN EL MATORRAL ÁRIDO COSTERO DE  
LA REGIÓN DE COQUIMBO A ESCALA FOLIAR Y ECOSISTÉMICA**

**WATER USE EFFICIENCY IN THE ARID COASTAL SCRUB OF THE  
COQUIMBO REGION AT A LEAF AND ECOSYSTEM SCALE**

**PÍA M.S. JARA TORRES**

**SANTIAGO, CHILE  
2011**



# UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

## EFICIENCIA DE USO DEL AGUA EN EL MATORRAL ÁRIDO COSTERO DE LA REGIÓN DE COQUIMBO A ESCALA FOLIAR Y ECOSISTÉMICA

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

**PÍA M.S. JARA TORRES**

<b>Profesor Guía</b>	<b>Calificaciones</b>
Sr. Jorge Pérez Q. Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	7,0
Sr. Rodrigo Fuster G. Ingeniero Agrónomo, M.Sc.	7,0
<b>Profesores Evaluadores</b>	
Sr. Nicolás Franck B. Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	6,8
Sr. Luis Morales S. Físico, Ph.D.	7,0

SANTIAGO, CHILE  
2011



## AGRADECIMIENTOS

La presente Memoria, si bien ha requerido de esfuerzo y constancia, no hubiese sido posible sin la ayuda desinteresada de un grupo importante de personas, a las que se les agradece a continuación.

En primer lugar agradezco a mi familia, a mis padres Mario y Ruth y a mi hermano por todo su esfuerzo, cariño incondicional y por sobre todo, su paciencia. A mi tío Miguel Ángel por insistir incansablemente en hacer de mi una mejor profesional, y a mis tías por simplemente apoyarme.

Al profesor Jorge Pérez, Nicolás Frank y Rodrigo Fuster, se les agradece profundamente su paciencia, los consejos entregados y su disposición cada vez que fue necesario.

Además, quiero agradecer a todos los que de manera totalmente desinteresada participaron leyendo, opinando, corrigiendo, y básicamente facilitando este proceso.

La realización y término de esta memoria, también da cuenta del término de una etapa, donde se agradece a todas las personas que hicieron de mis años de universidad un muy buen recuerdo. A mis queridas amigas, con las que soportamos largas jornadas de estudio y también de recreación y a todos mis compañeros y amigos, los que hicieron de esto algo inolvidable.

Y por último, a quien adoro, por estar acompañándome y cuidándome todo el tiempo a pesar de la distancia, mi tata Mario, y también a mi abuela quien en vida a pesar de todas las dificultades, siempre se preocupó por nosotros.



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
Objetivo General .....	5
Objetivos Específicos .....	5
<b>MATERIALES Y MÉTODO</b> .....	<b>6</b>
Área de estudio .....	6
Estimación y comparación de la eficiencia de uso del agua de especies arbustivas a escala foliar .....	6
Análisis estadístico .....	7
Estimación de la eficiencia de uso del agua a nivel de ecosistema y análisis de su variación estacional .....	7
Análisis estadístico .....	8
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>9</b>
Factores que influyen en la eficiencia de uso del agua a escala foliar .....	9
Eficiencia de uso del agua de tres especies arbustivas .....	11
Eficiencia de uso del agua a nivel de ecosistema y variables que la componen .....	14
Relaciones ambientales que explican el comportamiento de la eficiencia de uso del agua a escala ecosistémica y de los flujos que la componen .....	17
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>23</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>24</b>
<b>APÉNDICE</b> .....	<b>29</b>



## TABLA DE CUADROS

Cuadro 1. ANOVA para la variable dependiente $EUA_F$ .....	9
Cuadro 2. Estimaciones obtenidas con Test de Tukey entre sectores para la variable dependiente $EUA_F$ [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].....	10
Cuadro 3. Test de Tukey entre sector y especie para la variable dependiente $EUA_F$ [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ]. .....	10
Cuadro 4. Subconjuntos de homogeneidad de Tukey para la $EUA_E$ [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ] en función de los tratamientos. ....	12
Cuadro 5. Media de conductancia estomática, fotosíntesis neta y transpiración en las especies. ....	13
Cuadro 6. Correlación lineal entre $EUA_E$ , $FCO_2$ y $FH_2O$ .....	16
Cuadro 7. Correlación lineal entre variables ambientales y $EUA_E$ [ $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].....	18



## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. $EUA_F$ [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ] por tratamiento con su respectiva desviación estándar. ....	11
Figura 2. a) Fijación de dióxido de carbono ( $FCO_2$ ), b) Evapotranspiración ( $FH_2O$ ) y c) $EUA_E$ diaria medida entre febrero del 2008 y octubre del 2010. Sólo se muestran los días en los que el balance de C fue positivo (hacia el ecosistema). ....	15
Figura 3. Diagrama de dispersión entre: a) $EUA_E$ y $FCO_2$ , b) $EUA_E$ y $FH_2O$ y c) $FCO_2$ y $FH_2O$ . ....	16
Figura 4. Precipitación y contenido de agua en el suelo diario medido entre febrero del 2008 y octubre del 2010. ....	18
Figura 5. a) Temperatura del aire (T), b) Humedad relativa (HR) y c) Presión de vapor de agua ( $e_a$ ) diario medido entre febrero del 2008 y octubre del 2010. ....	20
Figura 6. Radiación fotosintéticamente activa diaria medida entre febrero del 2008 y octubre del 2010. ....	21
Figura 7. Velocidad del viento diaria medida entre febrero del 2008 y octubre del 2010. ....	21



## RESUMEN

La creciente demanda de agua frente a la limitada disponibilidad de ésta misma, puede combatirse intentando lograr un equilibrio entre la oferta natural y el uso eficiente del recurso, poniendo especial énfasis en ambientes donde las condiciones ambientales son extremas. En este sentido, se ha hecho necesario comparar la eficiencia de uso del agua (EUA) de especies arbustivas a escala foliar y ecosistémica en la Región de Coquimbo. A nivel foliar se midió el intercambio gaseoso de tres especies arbustivas: *Flourensia thurifera*, *Gutierrezia resinosa* y *Acacia saligna*, las que se encontraban presentes en dos sectores de matorral árido costero, en condiciones forestadas y naturales. La diferencia entre ambos sectores radica, en que este último no cuenta con la presencia de *Acacia saligna*. Los datos se compararon mediante un análisis de varianza, para así determinar si existían diferencias significativas de eficiencia determinados por los factores horario del día, sector y especie. Las dos últimas variables resultaron ser significativas, siendo *Flourensia thurifera* en sector natural (8,2) > *Flourensia thurifera* en sector forestado (5,0) > *Acacia saligna* en sector forestado (4,6) > *Gutierrezia resinosa* en sector natural (3,7) y > *Gutierrezia resinosa* en sector forestado (2,1). En cuanto a la eficiencia de uso del agua a escala ecosistémica (EUA<sub>E</sub>), se midió el intercambio gaseoso en el sector natural a través del equipo Bowen Ratio, analizando la variación estacional en función de factores ambientales tales como precipitación, contenido de agua en el suelo, temperatura del aire, humedad relativa, presión de vapor de agua, radiación fotosintéticamente activa y velocidad del viento, siendo el contenido de agua en el suelo y la temperatura del aire determinantes en los valores de EUA<sub>E</sub>. Los registros más altos se dieron durante la temporada de verano, cuando existe una menor disponibilidad de agua, mientras que en el invierno la eficiencia presentó sus menores valores debido a la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

**Palabras claves:** Eficiencia de uso del agua, Intercambio gaseoso, Factores ambientales, *Acacia saligna*, *Flourensia thurifera* y *Gutierrezia resinosa*.

## ABSTRACT

The growing demand of water against the limited availability can be combated by trying to reach a balance between natural offer and efficient use of the resource, with special emphasis on areas where environmental conditions are extreme. In this regard, has become important to compare the water use efficiency (WUE) of shrub species at leaf and ecosystem scales the Coquimbo region. At the leaf scale, gas exchange was measured for three shrub species: *Flourensia thurifera*, *Gutierrezia resinosa* and *Acacia saligna*, which were divided in two sectors, a forested and a natural. The difference between them is that the natural area doesn't have *Acacia saligna*. The data were compared using analysis of variance, in order to determine whether there were significant differences caused by factors such as time of the day, sector and sector. The last two variables were found to be significant, being *Flourensia thurifera* en sector natural (8,2) > *Flourensia thurifera* en sector forestado (5,0) > *Acacia saligna* en sector forestado (4,6) > *Gutierrezia resinosa* en sector natural (3,7) y > *Gutierrezia resinosa* en sector forestado (2,1). In terms of water use efficiency at ecosystem level (WUE<sub>E</sub>) gas exchange was measured in the natural area through Bowen Ratio equipment, analyzing the seasonal variation in function of environmental factors such as: air temperature, soil water content, relative humidity, wind velocity, etc. Soil water content and the air temperature were the determinant of the WUE<sub>E</sub> obtained. The highest values were on the summer season, when water availability is lower, instead of what happened on winter when the release of CO<sub>2</sub> into the atmosphere decreases the efficiency.

Key words: Water use efficiency, Gas exchange, Environmental factors, *Acacia saligna*, *Flourensia thurifera* and *Gutierrezia resinosa*.

## INTRODUCCIÓN

En la última década, las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera han incrementado de manera exponencial producto de distintas actividades antrópicas, como la quema de combustibles fósiles y el proceso de cambio de uso de suelo (Houghton *et al.*, 1990). Este aumento de CO<sub>2</sub> traería consigo un aumento global de temperatura de entre 1,1 y 6,4 °C en los próximos 100 años (Solomon *et al.*, 2007), además de generar efectos sobre la fisiología y la producción de biomasa en las plantas (Kimball, 1983).

El enriquecimiento de CO<sub>2</sub> en el ciclo de la planta estimula el crecimiento y el desarrollo en la mayoría de éstas (Aznar, 2002). Distintos estudios postulan que concentraciones muy altas de CO<sub>2</sub> no inhiben la fotosíntesis, sino que permiten obtener balances de carbono mayores a los observados frente a concentraciones normales de CO<sub>2</sub> (Dukes, 2000; Herrera *et al.*, 2001). Además, se ha demostrado que concentraciones sobre lo normal en la atmósfera aumentan los niveles de eficiencia de uso del agua (McCarthy *et al.*, 2001). Esto porque las plantas desarrollan diferentes respuestas frente al estrés hídrico y al aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, con el fin de: asegurar la supervivencia de la especie, aumentar la disponibilidad de agua y, a su vez, aumentar la eficiencia de su uso (Schulze, 1986).

La eficiencia de uso del agua (EUA) es primordial en la fisiología de la planta y en la producción bajo condiciones de sequía; según Medrado *et al.* (2007) corresponde al volumen de agua que las plantas necesitan consumir para incorporar a su biomasa una determinada cantidad de carbono proveniente de la atmósfera. Existen otras definiciones para la EUA, que varían dependiendo de la escala a la que se quiera medir, por ejemplo, a escala foliar corresponde a la cantidad de CO<sub>2</sub> asimilado por unidad de agua transpirada (Gil-Marín *et al.*, s.a.), mientras que a nivel de ecosistema o cultivo, se puede entender como la relación de biomasa aérea producida, por cantidad de agua evapotranspirada (Medrado *et al.*, 2007). Por esto, la EUA puede aumentar ya sea por la disminución de agua utilizada, o a través de la mayor captación de CO<sub>2</sub> para la fotosíntesis.

La EUA a escala foliar corresponde al cociente entre entrada neta de CO<sub>2</sub> en la hoja y salida de agua de esta misma, y puede ser medida de dos maneras: una es por medio de la eficiencia intrínseca en el uso del agua y la otra es por medio de la eficiencia de transpiración. La diferencia es que esta última considera las condiciones ambientales existentes. Por esta razón, la EUA depende de dos tipos de factores: primero, de las características intrínsecas de la especie, lo que incluye la capacidad de optimización tanto del carbono como de la transpiración de la planta y, en segundo lugar, de las características que presente el ambiente en el que se encuentra la especie (Medrado *et al.*, 2007). Además es importante tener en consideración que la EUA es relativamente estable dentro de una especie, por lo cual, en un periodo de crecimiento prolongado y mediante el conocimiento de la transpiración, es posible predecir la cantidad de biomasa aérea generada (Silva y Acevedo, 1995).

En cuanto a la EUA a escala de ecosistema, esta no es solamente afectada por la eficiencia intrínseca de las plantas, sino que también hay una influencia por parte de los procesos ocurridos en la superficie del suelo, los que están condicionados por las variables ambientales. Estos procesos corresponden a la pérdida de CO<sub>2</sub> por medio de la respiración de las plantas, la descomposición microbiana de la materia orgánica y la evaporación de la humedad del suelo, entre otras (Emmerich, 2007). Aun así, es la influencia del follaje la principal componente que controla los flujos en la planta (Bolstad *et al.*, 2004; Monson *et al.*, 2009).

La zona norte de Chile es considerada climatológicamente árida o semiárida, abarcando un 41% de la superficie nacional (Benites *et al.*, 1994). En estos ambientes, tanto las actividades agrícolas como ganaderas están determinadas por la disponibilidad de agua, debido a que las condiciones pluviométricas son desfavorables para poder llevar a cabo un óptimo crecimiento en las plantas. Se espera que con el aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, las plantas aumenten su productividad, además de aumentar su tolerancia a condiciones ambientales, como salinidad del suelo y temperaturas extremas (Bast y Bast, 2009).

Uno de los sectores que presenta estas condiciones ambientales es la Región de Coquimbo, donde Gajardo (1994) define tres Regiones Vegetacionales: Desierto, Estepa Alto-Andina y Matorral y Bosque Esclerófilo. Este último, a su vez, tiene como subregión más representativa, en cuanto a superficie, el Matorral Estepárico, donde de las cuatro formaciones vegetales que se pueden observar, se encuentra el Matorral Estepárico Costero. En este predominan las formaciones de arbustos bajos de hojas duras, distribuidos sobre grandes terrazas costeras y en las laderas cercanas al océano. La temporada de precipitación invernal resulta favorable para el desarrollo de un estrato herbáceo primaveral, aunque es normal encontrar extensas áreas de suelo descubierto. En esta región, producto de actividades antrópicas, se puede observar la introducción de otras especies, como por ejemplo *Atriplex spp.* y *Acacia saligna*.

*Acacia saligna* se caracteriza por ser una especie multipropósito, sirve como fuente de forraje, controla la erosión y es de uso energético. A su vez se adapta a suelos salinos, escasamente ácidos, calcáreos, con texturas arenosas o franco arenosas, poco profundos, pobres en nitrógeno y fósforo, por lo que resulta atractiva para la forestación en zonas áridas. Además es una especie que crece rápidamente, tolera la sequía y mejora la infiltración del agua (Mora *et al.*, 2002).

Se espera que la EUA sea alta en *Acacia saligna*, esto debido a que estudios realizados en zonas con ambientes similares a los de la Región de Coquimbo muestran que el incremento de la disponibilidad de agua en el suelo, aumenta el crecimiento y la producción de materia seca de la especie, sin embargo la eficiencia en el uso del agua disminuye. Por lo tanto, al crecer en condiciones de menor disponibilidad hídrica, la EUA será mayor (Mora *et al.*, 2002).

Dada las condiciones recién señaladas, resulta importante estudiar el comportamiento de las distintas especies a través de su intercambio gaseoso, sobre todo en aquellos sectores donde la disponibilidad hídrica es escasa. De esta forma, lo que esta investigación pretende es

determinar la EUA de las plantas a escala foliar y ecosistémica, información que, en el futuro, podría servir de base para el desarrollo de estrategias de manejo más eficientes en el uso del agua en suelos de zonas áridas o semiáridas.

### **Objetivo General**

Determinar la eficiencia de uso del agua en el matorral árido a escala foliar y ecosistémica.

### **Objetivos Específicos**

- Estimar y comparar la eficiencia de uso del agua de especies arbustivas a escala foliar.
- Estimar la eficiencia de uso del agua a escala ecosistémica y analizar su variación estacional.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Área de estudio

El estudio se realizó en la Estación Experimental Las Cardas, Provincia del Limarí, Región de Coquimbo, ubicada a 30°14' S, 71°16' O, con una precipitación media anual de 130 mm, una temperatura media que varía dependiendo de la época del año, con una máxima para enero de 26 °C y una mínima en julio no inferior a los 5 °C. El área de estudio comprende dos sectores de 60 ha de Matorral Costero, uno en condiciones naturales y el otro forestado con *Acacia saligna*.

El sector natural está dominado por especies arbustivas como *Flourensia thurifera* (Mol.) DC (caducifolias), *Gutierrezia resinosa* (Hook. Et Arm) Blacke y *Haplopappus cerberoanus* (Remy) Reiche (perenne), gramíneas anuales (*Bromus spp.* y especies de Avena) y herbáceas (*Erodium spp.*) (Pérez, 1996). El otro sector fue forestado con *Acacia saligna* el 2005, gracias a un proyecto de recuperación de suelos degradados y forestación. En la actualidad la plantación tiene una densidad de 1200 individuos por ha.

### Estimación y comparación de la eficiencia de uso del agua de especies arbustivas a escala foliar

Para poder determinar la eficiencia de uso del agua a escala foliar ( $EUA_F$ ) en distintas especies arbustivas, se utilizaron los datos generados con el equipo LCPro (ADC BioScientific Ltd., Hoddesdon, U.K.), con el que se midió el intercambio gaseoso instantáneo a través de un analizador de gases infrarrojo (IRGA). Se seleccionaron hojas completamente expandidas y expuestas al sol de tres especies: *Flourensia thurifera*, *Gutierrezia resinosa* y *Acacia saligna* (en adelante FT, GR y AS, respectivamente), las cuales posteriormente se marcaron con cinta adhesiva de color para poder identificarlas. Para aquellas especies que presentaban área foliar inferior al de la cámara ( $6,25 \text{ cm}^2$ ), fue necesario corregir los flujos en función del área real de la hoja. Por cada hoja se realizaron mediciones en dos períodos del día (en la mañana y en la tarde), entre el 6 y 7 de octubre del 2009, para el sector natural y forestado respectivamente. Una vez que la tasa fotosintética se estabilizó en la cámara de medición del IRGA, se tomaron de manera simultánea 3 registros de radiación fotosintéticamente activa incidente ( $PAR_i$ ), tasa fotosintética (A), conductancia estomática ( $g_s$ ), temperatura foliar ( $T_f$ ) y transpiración (E). Para analizar los datos se utilizó el promedio de los tres registros efectuados por hoja, y en caso de que uno de estos registros estuviese fuera del rango normal – lo que puede pasar debido al no cumplimiento de las condiciones de toma de muestras del analizador de gases – se promedió sólo con los datos restantes.

Con las variables E y A, se obtuvo la EUA a escala foliar ( $EUA_F$ ) o instantánea en  $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ , a través de la siguiente ecuación (Medrado *et al.*, 2007):

$$EUA_F = \frac{A}{E}, \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde,

A: Entrada neta de  $\text{CO}_2$  en la hoja [ $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ]

E: Salida de agua de la hoja [ $\text{mol H}_2\text{O m}^2 \text{ s}^{-1}$ ]

### **Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico se realizó un análisis de varianza (ANOVA), donde las fuentes de variación fueron: sector, especie y horario del día, y las distintas plantas correspondieron a las repeticiones. Para esto se promedió la  $EUA_F$  de cada registro por hoja y, a su vez, se promediaron los valores de todas las hojas para obtener la  $EUA_F$  por planta. En el sector natural se midieron 4 plantas de GR y 4 plantas de FT, mientras que en el sector forestado, se midieron 3 plantas de cada especie mencionada, más 3 plantas de AS.

El primer ANOVA y posterior Test de Tukey tuvo como fin determinar cuál o cuáles de los factores: sector, especie, horario del día (AM/PM) y sus interacciones (sector/especie, sector/(AM/PM), especie/(AM/PM), sector/especie/(AM/PM)) resultaron ser significativos para los valores de  $EUA_F$ . Todo esto sólo para las especies FT y GR, ya que lo que se pretendía era determinar si existían diferencias significativas de  $EUA_F$  con la presencia de AS en el sector forestado.

Además, se realizó un segundo ANOVA y Test de Tukey para comparar la  $EUA_F$  entre tratamientos, esta vez incorporando a *Acacia saligna* en el análisis, determinando de esta manera cuál de todas las especies, dependiendo del sector en el que se encontraban, era más eficiente en el uso del agua. Los tratamientos corresponden a los cruces o interacciones entre sector y especie, es decir: *Flourensia thurifera* y *Gutierrezia resinosa* en sector natural (FT\_SN y GR\_SN respectivamente) y *Flourensia thurifera*, *Gutierrezia resinosa* y *Acacia saligna* en sector forestado (FT\_SF, GR\_SF y AS\_SF respectivamente).

### **Estimación de la eficiencia de uso del agua a nivel de ecosistema y análisis de su variación estacional**

Para medir el intercambio de gases a nivel de ecosistema, a través de técnicas no destructivas, se utilizó la estación micrometeorológica Bowen Ratio (Model 023/ $\text{CO}_2$ , Bowen Ratio System, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, EEUU). Equipo fijo que realizó mediciones por segundo, para luego registrar los promedios de cada variable en

intervalos de 20 minutos, obteniendo un total de 72 datos por día, entre febrero del 2008 y octubre del 2010. Este instrumento calcula los flujos de gases para un área relativamente extensa, superior a 16 ha, aunque esto depende de la velocidad del viento que presente el lugar.

La estación Bowen Ratio midió un conjunto de variables ambientales: gradiente y concentración de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, temperatura del aire, radiación neta (R<sub>n</sub>), humedad relativa (HR), radiación fotosintéticamente activa (PAR), velocidad y dirección del viento, flujos de calor y temperatura del suelo. Los flujos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O fueron estimados a través de cálculos que se basan en la ecuación del balance de energía. Estos flujos calculados por la Bowen Ratio corresponden al intercambio neto del ecosistema (Campbell Scientific, 2005).

Para estimar y conocer la eficiencia de uso del agua a nivel de ecosistema (EUA<sub>E</sub>) en mg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O se utilizó la relación que existe entre ambos flujos:

$$EUA_E = \frac{FCO_2}{FH_2O}, \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde,

FCO<sub>2</sub>: Flujo de dióxido de carbono [mg CO<sub>2</sub> m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>]

FH<sub>2</sub>O: Flujo de evapotranspiración [g H<sub>2</sub>O m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>]

### **Análisis estadístico**

Los flujos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O estimados por medio del equipo Bowen Ratio fueron revisados a través del protocolo propuesto por Pérez-Quezada *et al.* (2007), el cual funciona en el programa estadístico R (R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria). Por último se eliminaron aquellos valores que se encontraban fuera del rango normal – por medio de bibliografía y análisis gráfico – tanto para los flujos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, como para el resto de las variables ambientales.

Las variables analizadas para conocer la relación y el comportamiento de la EUA<sub>E</sub> de acuerdo a su variación estacional a lo largo del año fueron: precipitación, contenido de agua en el suelo, temperatura del aire, humedad relativa, presión de vapor de agua, radiación fotosintéticamente activa y velocidad del viento. Esto se realizó por medio de correlaciones lineales simples y múltiples y por medio de análisis gráfico de los resultados. Los datos que se utilizaron para el cumplimiento del segundo objetivo son los provenientes del sector natural.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Factores que influyen en la eficiencia de uso del agua a escala foliar

A partir de un ANOVA con un  $p < 0,05$ , se determinó si existían diferencias significativas entre los factores sector, especie y horario del día. En el ANOVA sólo se consideraron las especies GR y FT, para determinar si existen diferencias de  $EUA_F$  ante la presencia de AS.

Cuadro 1. ANOVA para la variable dependiente  $EUA_F$ .

Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media al cuadrado	F	Sig.
Modelo corregido	148,108	7	21,158	21,621	0,000 *
Intercepto	630,118	1	630,118	643,893	0,000 *
Especie	94,648	1	94,648	96,717	0,000 *
Sector	38,930	1	38,930	39,781	0,000 *
Horario	0,207	1	0,207	0,211	0,651
Sector x Horario	0,746	1	0,746	0,762	0,393
Sector x Especie	4,594	1	4,594	4,695	0,043 *
Horario x Especie	0,040	1	0,040	0,041	0,843
Sector x Horario x Especie	0,925	1	0,925	0,945	0,343
Error	19,572	20	0,979		
Total	857,418	28			
Total corregido	167,680	27			

$R^2=0,88$

\* Variables con diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

En el Cuadro 1 se observa que el modelo corregido, la intersección y las variables especie, sector y la combinación entre ambas son significativas. Esto quiere decir que estas variables son relevantes para determinar el comportamiento de la variable dependiente  $EUA_F$ . Este modelo explica una parte importante de la variable dependiente  $EUA_F$ . Además, del Cuadro 1 se desprende que tanto los tres factores como sus cuatro interacciones, explican en un 0,88 el comportamiento de la  $EUA_F$ .

Para la variable especie, el Test de Tukey presentó diferencias significativas entre FT y GR, con una media de 6,65 y 2,93  $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$  respectivamente (Apéndice I), siendo FT considerablemente más eficiente.

Un parámetro importante de conocer a la hora de comparar la EUA entre especies, corresponde a las vías metabólicas que éstas presentan. En este caso, las tres especies estudiadas pertenecen al grupo  $C_3$  (Lema, 1998; Nativ *et al.*, 1999; Wan *et al.*, 1993), el que difiere de  $C_4$  y CAM en que es el único que incorpora el  $\text{CO}_2$  de manera directa, ya que los otros dos fijan el  $\text{CO}_2$  a otros compuestos con el fin de adaptarse mejor a condiciones ambientales cálidas y secas, respectivamente (Dobb *et al.*, 2002). Como las tres especies

estudiadas son parte del mismo grupo, según vías metabólicas, ésta no es una variable que podría explicar el comportamiento que estas presentan frente a los resultados obtenidos de  $EUA_F$ .

En el Cuadro 2 se observa que el sector natural (SN) es el que presentó los mayores valores de  $EUA_F$ , lo que se atribuirse, por un lado, a que la toma de datos se realizó los días 6 y 7 de octubre del 2009, en donde las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) entre ambos días diferían. Por otra parte, esta diferencia entre sectores podría ser atribuible a la incorporación de AS, ya que para esto fue necesario realizar camellones y, en consecuencia, la remoción de la cobertura vegetal en el SF, pudiendo así afectar el normal funcionamiento de las especies presentes (Apéndice II) (Llambías, 2009). Adicionalmente, un estudio realizado por Delpiano (2009), menciona que FT y GR presentaron las mayores concentraciones de carbono en el suelo no forestado. Esto lo atribuyó a las diferencias de cobertura vegetal existente, debido a la preparación de la tierra en este sector.

Es importante recordar que existen más especies nativas interactuando en el lugar, FT y GR son las especies dominantes en ambos sectores (Delpiano, 2009), y es la presencia de AS en el sector forestado (SF) la única diferencia entre ambos. Es por esto que las diferencias entre sectores no deberían ser atribuidas a la presencia de estas otras especies (codominantes).

Cuadro 2. Estimaciones obtenidas con Test de Tukey entre sectores para la variable dependiente  $EUA_F$  [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].

Sector	Media	Error estándar	Sig.
SF	3,602	0,286	0,000 *
SN	5,984	0,247	

\* Variables con diferencias significativas.

El Cuadro 3 nos permite ver cuál es la eficiencia que presenta cada especie dependiendo del sector en el que se encuentra. En ambos sectores GR tiene diferencias significativas con FT (Apéndice I), disminuyendo ambas su eficiencia en el SF. Esta disminución muestra que las especies de este sector disminuyen su eficiencia en un 40%, y a su vez, en ambos sectores la diferencia de eficiencia entre especies es de aproximadamente un 60%. Esto quiere decir que, independiente del sector y de las condiciones externas en las que se encuentren, las dos especies actúan de manera similar, manteniendo siempre FT la mayor  $EUA_F$ .

Cuadro 3. Test de Tukey entre sector y especie para la variable dependiente  $EUA_F$  [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].

Sector	Especie	Media	Error estándar	Sig.
SF	FT	5,050	0,404	0,000 *
	GR	2,153	0,404	
SN	FT	8,251	0,350	0,000 *
	GR	3,718	0,350	

\* Variables con diferencias significativas.

## Eficiencia de uso del agua de tres especies arbustivas

Como se ve en el Cuadro 3, con el Test de Tukey sólo se pudo apreciar si existían diferencias significativas de  $EUA_F$  entre FT y GR dentro de un mismo sector, y no entre sectores ni entre la misma especie en distinto sector. Además, tampoco se estimó ni se analizó los valores de  $EUA_F$  que presenta AS en el área de estudio. Debido a esto, se llevó a cabo un segundo ANOVA para conocer las diferencias significativas entre los cinco tratamientos involucrados. De esta manera se pudo analizar si, además de existir diferencias entre especie, existe diferencia dentro de una misma especie en distinto sector. No se tomó en consideración el factor horario del día (AM/PM), ya que no presentó diferencias significativas en el ANOVA anterior (Cuadro 1).

El análisis de varianza entre los cinco tratamientos, con un valor de  $p < 0,05$ , arrojó que existían diferencias significativas de eficiencia, con un  $R^2$  igual a 0,85. En este segundo análisis estadístico solamente se utilizó el factor tratamiento.

A continuación, en la Figura 1, se observan las medias y su respectiva desviación estándar por tratamiento.

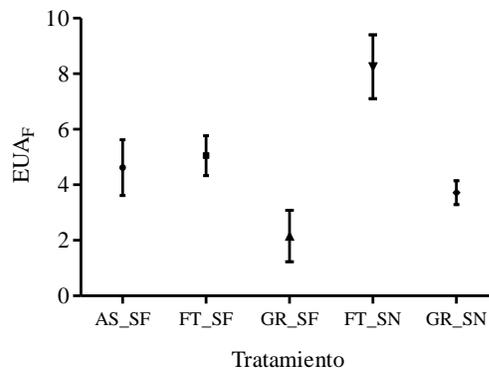


Figura 1.  $EUA_F$  [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ] por tratamiento con su respectiva desviación estándar.

Una vez corroborada la dependencia entre las variables, se realizó un Test de Tukey, en el cual se identificó si existían diferencias significativas entre todos los tratamientos o sólo en parte de ellos. En el Cuadro 4 se aprecian los valores de las medias y la agrupación que hace el Test de Tukey en función de la significancia que existe entre tratamientos. En el subconjunto 2 se observa que GR en el SN no presenta diferencias significativas con AS y FT en SF, obteniendo todos estos valores intermedios de eficiencia. Por otro lado, GR en el SF y FT en el SN, presentaron diferencias significativas entre sí y con el resto de los tratamientos, obteniendo el menor y el mayor valor respectivamente. Es por lo tanto esta última la que presentó los mayores valores de  $EUA_F$  frente al resto de los tratamientos, incluso superando a AS – especie que se caracteriza por aumentar su EUA en condiciones de menor disponibilidad hídrica – aunque cabe señalar que cuando ambas especies se encuentran en el mismo sector, no hay diferencias significativas entre sus medias (Apéndice IV). Los resultados obtenidos no concuerdan con lo señalado por Mora *et al.* (2002) quienes mencionan que AS es una especie que se caracteriza por tolerar la sequía,

crecer rápidamente y que en condiciones de menos disponibilidad hídrica, aumenta su EUA.

Cuadro 4. Subconjuntos de homogeneidad de Tukey para la  $EUA_E$  [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ] en función de los tratamientos.

Tratamiento	N	Subconjunto		
		1	2	3
GR_SF	6	2,153		
GR_SN	8		3,718	
AS_SF	6		4,618	
FT_SF	6		5,050	
FT_SN	8			8,251
Sig.		1	0,103	1

En cuanto a información obtenida sobre otros estudios realizados en el sector de Las Cardas, Lema (1998) señala que FT presentó menores valores de EUA a nivel de planta frente a *Opuntia ficus-indica* (CAM) y *Atriplex nummularia* (C<sub>4</sub>) respectivamente. Los valores obtenidos fueron 1,5; 3,9 y 5,1 g de materia seca  $\text{Kg}^{-1}$  agua aplicada respectivamente. Además, menciona que FT frente a un estrés hídrico importante, responde a la sequía principalmente por la reducción gradual de la superficie foliar y posterior caída (Apéndice V). El mismo autor mencionó que FT mostró pronunciadas depresiones al mediodía en las tasas de pérdida de agua, por lo que además controla la sequía a través de los estomas (Mooney y Kummerow, 1971).

Existe información citada por distintos autores en cuanto a la EUA, la que por lo general se traduce como la eficiencia medida a nivel de planta, correspondiendo al cociente entre materia seca y cantidad de agua consumida (Fernández y Camacho, 2005; Lema, 1998; Medrano *et al.*, 2007). La información no resulta fácilmente extrapolable entre escalas (EUA a nivel de planta y  $EUA_F$ ), debido a que las medidas entre éstas varía según la especie, las condiciones ambientales y las variables de medición (Medrado *et al.*, 2007). Aun así, datos obtenidos por López *et al.* (2001) sobre especies forestales en condiciones ambientales más favorables a las estudiadas, presentaron valores de  $EUA_F$  que van de 5,3 hasta 3,5  $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ , valores similares a los obtenidos en este estudio.

Debido a que no existen diferencias significativas entre las medias de horario del día (AM/PM) para las distintas especies, no fueron incluidas en el Cuadro 5, el que tiene como fin analizar en detalle las variables que conforman la  $EUA_F$  de manera independiente. Esto debido a que la definición de  $EUA_F$  señala que puede aumentar ya sea por la disminución en la transpiración, o por medio de un incremento de la captación de  $\text{CO}_2$  para la fotosíntesis, siendo la conductancia estomática fundamental en el intercambio gaseoso que existe entre la atmósfera y la hoja.

Cuadro 5. Media de conductancia estomática, fotosíntesis neta y transpiración en las especies.

Sector	Especie	Promedio de	Promedio de	Promedio de
		Conductancia estomática	Fotosíntesis neta	Transpiración
		mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
SF	AS	0,586	27,229	5,896
	FT	0,343	22,738	4,503
	GR	0,160	9,431	4,380
SN	FT	1,231	26,889	3,259
	GR	0,501	14,127	3,800

En el Cuadro 5, y como mencionó Mooney y Kummerow (1971), FT controla el estrés hídrico a través del cierre de estomas, de esta manera la planta se resguarda frente a condiciones adversas como la pérdida de agua. Esto se corrobora en la toma de datos, las mediciones se realizaron entre los días 6 y 7 de octubre del 2009, ambos días presentaron diferencias en cuanto a temperatura y humedad relativa. El día 6 de octubre se tomaron los datos en el SN, los que arrojaron una temperatura máxima y una humedad relativa mínima de 24,5 °C y 19,1% respectivamente, mientras que el día 7 de octubre los datos para el SF alcanzaron una media de 30,1 °C, y una humedad relativa de 17,9%.

La conductancia estomática cumple la función de controlar los flujos de agua que existen entre la hoja de la planta y la atmósfera; mientras más abierto los estomas, mayor será la conductancia y menor la resistencia que existe entre los sistemas (Barceló *et al.*, 1990). Se espera que las medias de transpiración sean proporcionales a la conductancia estomática. Esto debido a que la tasa de agua transpirada por las hojas depende del gradiente de vapor de agua entre los estomas y el aire y, a su vez, de lo abierto que estos estén (Medrado *et al.*, 2007). En este caso, si se compara la misma especie en distinto sector – tanto para FT como para GR – se observa que en el SF al haber un mayor déficit de presión de agua (DPV) en comparación con el SN, existe una mayor transpiración en ambas especies.

Tanto la temperatura, como la humedad relativa son variables a considerar a la hora de determinar la  $EUA_F$ , esto porque ambas tienen un efecto sobre la diferencia de presión de vapor de agua ( $e_a$ ) o DPV, el que representa la diferencia de presión que existe entre el interior de la hoja y el ambiente, teniendo un efecto directo sobre la transpiración de la planta (Urrestarazu, 2004).

La transpiración aumenta a medida que disminuye la humedad relativa del aire, esto ocurre porque las cavidades subestomáticas se encuentran prácticamente saturadas, y la atmósfera, que presenta concentraciones menores de agua, genera un gradiente de concentración entre ambos sistemas, en donde, mientras mayor sea el gradiente, mayor será la tasa de transpiración. De esta forma, si se eleva la transpiración, pero no se incrementa la fotosíntesis, habrá una disminución en la  $EUA_F$  (Parra y Hernández, 2007).

Por otra parte, un aumento en la temperatura genera una disminución en la humedad relativa, y con ello se produce un aumento en la transpiración, disminuyendo así la  $EUA_F$  (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Esto se corrobora con los datos entregados por el equipo LCPro, donde se observa que al haber una mayor temperatura en el SF, menor es la humedad relativa de este. Además, un aumento en la temperatura provoca el cierre de los estomas, dificultando la difusión del  $CO_2$  hacia los cloroplastos, y con ello la reducción en el proceso (Ver Cuadro 5) (Medrado *et al.*, 2007).

Según Barceló *et al.* (1990), dentro de un rango normal de temperatura, la apertura o cierre de estomas no trae consigo cambios. Sin embargo, y de acuerdo al mismo autor, cuando ésta aumenta de manera considerable, en algunas especies se genera el cierre. En donde un número importante de ellas – en ambientes cálidos – cierran sus estomas a mediodía, producto de una combinación de estrés hídrico y del efecto que tiene la temperatura sobre las concentraciones de  $CO_2$ .

Si se observa con más detalle los datos entregados en el Cuadro 5, se podrá ver que cuando la temperatura aumentó en  $5,5\text{ }^\circ\text{C}$ , la transpiración en ambas especie aumentó alrededor de un 20%, mientras la conductancia estomática y la fotosíntesis disminuyeron aproximadamente en un 60% y 25% respectivamente. Tanto GR como FT, se comportan de manera similar frente a las condiciones ambientales externas, además de que cumplen con las condiciones establecidas por otros autores, donde la transpiración aumenta de manera proporcional a la temperatura y de manera inversa a la humedad relativa.

### **Eficiencia de uso del agua a nivel de ecosistema y variables que la componen**

En esta segunda parte del estudio, la información está centrada en la relación que existe entre los flujos de vapor de agua y dióxido de carbono medidos en el ecosistema, y las variables externas que influyen en la EUA a escalas de tiempo más largas: variabilidad interanual (2008-2010) e intraestacional. La variabilidad interanual de la  $EUA_E$  resulta compleja, ya que existen múltiples interacciones entre el agua y el carbono, además de la influencia de diversos factores ambientales sobre ésta (Tian *et al.*, 2010), mientras que para la variabilidad intraestacional es necesario tener en cuenta el periodo de crecimiento de las especies, ya que son las que influyen de manera directa en el intercambio del  $CO_2$  y del  $H_2O$  en el ecosistema.

Antes de analizar el comportamiento obtenido por los distintos factores ambientales a lo largo del tiempo, se presenta en la Figura 2 la  $EUA_E$  a partir del 31 de enero del 2008 hasta el 13 de octubre del 2010, al igual que los flujos de  $CO_2$  y  $H_2O$ . Estos cambios en los flujos pueden ser explicados en parte por los factores ambientales. Aquí se observa que en la Figura 2c los valores de  $EUA_E$  más altos ocurren en la temporada de verano, cuando las condiciones ambientales son más extremas debido a que la temperatura y la radiación solar aumentan y que además no existen aportes de agua al sistema.

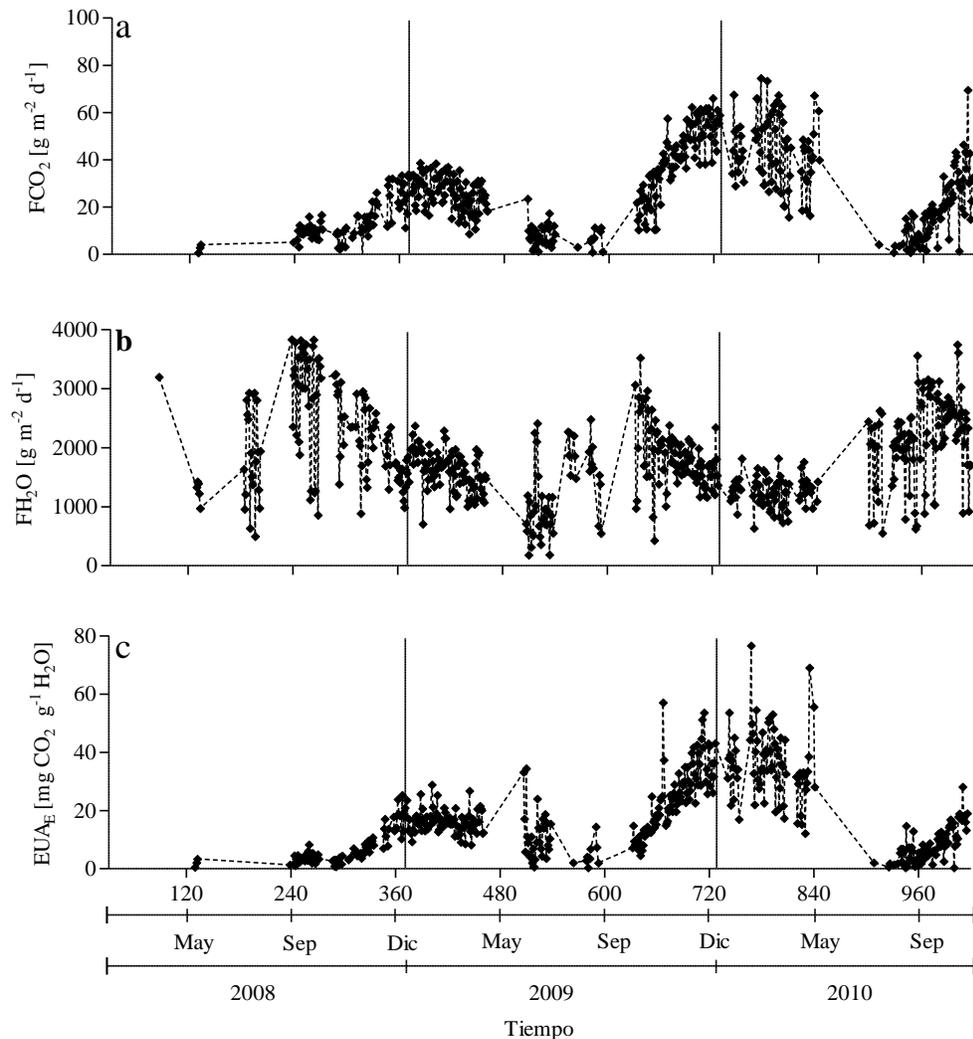


Figura 2. a) Fijación de dióxido de carbono ( $\text{FCO}_2$ ), b) Evapotranspiración ( $\text{FH}_2\text{O}$ ) y c)  $\text{EUA}_E$  diaria medida entre febrero del 2008 y octubre del 2010. Sólo se muestran los días en los que el balance de C fue positivo (hacia el ecosistema).

Para poder entender y explicar mejor el comportamiento de la  $\text{EUA}_E$ , se analizaron los flujos que la componen por separado. Ambos tienen un comportamiento que varía a lo largo del tiempo, la  $\text{EUA}_E$  sigue una tendencia similar al del  $\text{FCO}_2$  en cuanto a su oscilación, ésta también presenta una tendencia lógica frente a las condiciones ambientales, mayor captación de  $\text{CO}_2$  durante el verano, disminuyendo paulatinamente hasta llegar al invierno, donde se produce una liberación de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, mientras que el  $\text{FH}_2\text{O}$  parece tener un comportamiento disperso a simple vista y con sus valores más altos en primavera, antes que los del  $\text{FCO}_2$  y de la  $\text{EUA}_E$ .

El  $\text{FH}_2\text{O}$  varía a lo largo del tiempo, siguiendo además, un patrón que puede ser explicado por medio de la variación intraestacional, teniendo valores más altos de vapor de agua durante la primavera, producto de la mayor presencia de follaje y de una mayor

disponibilidad de agua en el suelo, luego del invierno. En el dióxido de carbono, también se observan diferencias interanuales e intraestacionales. Para el primer caso, existe un aumento en el  $\text{FCO}_2$  el verano del 2010 en comparación con el del 2009, el que también varía de manera estacional, obteniendo sus máximas durante la temporada de verano.

Por medio de una correlación lineal en el Cuadro 6, se obtuvo que  $\text{FCO}_2$  es la variable que presentó una mayor relación con la  $\text{EUA}_E$ , con un  $R^2$  igual a 0,76 y un error estándar menor al del  $\text{FH}_2\text{O}$ . Esto concuerda con lo expuesto en la Figura 2, donde las oscilaciones y los picos se asemejan más a los de fijación de dióxido de carbono que a los del  $\text{FH}_2\text{O}$ .

En la Figura 3 se pueden ver las dispersiones que presentaron las correlaciones del Cuadro 6, en la Figura 3a la  $\text{EUA}_E$  es directamente proporcional al  $\text{FCO}_2$ , contrario a lo que pasa con el  $\text{FH}_2\text{O}$ , donde al aumentar este, disminuye la eficiencia. En cuanto a la relación entre las variables que componen la  $\text{EUA}_E$ , el  $R^2$  igual a 0,024 da muestra que la dependencia entre éstas es mínima, aunque en la Figura 3c se aprecia con claridad que la mayoría de los datos del  $\text{FCO}_2$  – que van desde 0 a  $80 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  – se concentran dentro de un rango intermedio del  $\text{FH}_2\text{O}$ , mientras que al aumentar o disminuir éste, la fijación de  $\text{CO}_2$  disminuye.

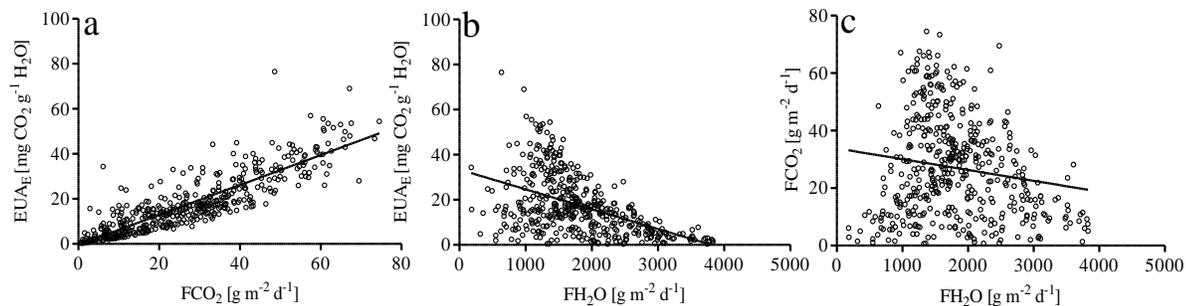


Figura 3. Diagrama de dispersión entre: a)  $\text{EUA}_E$  y  $\text{FCO}_2$ , b)  $\text{EUA}_E$  y  $\text{FH}_2\text{O}$  y c)  $\text{FCO}_2$  y  $\text{FH}_2\text{O}$ .

Cuadro 6. Correlación lineal entre  $\text{EUA}_E$ ,  $\text{FCO}_2$  y  $\text{FH}_2\text{O}$ .

Variable X	Variable Y	Y=a+bx		$R^2$	Error estándar
		a	b		
$\text{FCO}_2 [\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}]$	$\text{EUA}_E [\text{mg CO}_2 \text{ g H}_2\text{O}^{-1}]$	-0,472	0,666	0,760	6,451
$\text{FH}_2\text{O} [\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}]$	$\text{EUA}_E [\text{mg CO}_2 \text{ g H}_2\text{O}^{-1}]$	33,440	-0,009	0,230	11,530
$\text{FH}_2\text{O} [\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}]$	$\text{FCO}_2 [\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}]$	33,818	0,0038	0,024	17,07

Con respecto a los datos, se observa en la Figura 2a y 2b que el  $\text{FCO}_2$  oscila entre 0 y  $80 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , mientras que el  $\text{FH}_2\text{O}$  lo hace entre 0 y  $4000 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Los datos de  $\text{H}_2\text{O}$  coinciden con información recopilada por otros autores en estudios realizados en ambientes semiáridos con presencia de matorrales y pastizales en el sureste de Arizona, donde los flujos van desde los 0 y  $5000 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Emmerich, 2007; Nagler *et al.*, 2007).

En el caso del FCO<sub>2</sub>, datos obtenidos por Jarvis *et al.* (2007) en bosques con clima mediterráneo señalan concentraciones que van desde 0 a 40 g m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, estas son considerablemente menores a las aquí presentadas. Si bien este estudio se realizó en un clima mediterráneo, la diferencia radica en una mayor cantidad de precipitaciones anuales, el que podría ser el causante de la diferencia de fijación de CO<sub>2</sub>. Otro estudio realizado por Emmerich (2007) en el suroeste de Arizona, arrojó valores dentro del mismo rango a los mencionados por Jarvis *et al.* (2007), aunque en este último las condiciones ambientales resultan similares a las de la Región de Coquimbo, con un clima semiárido, una precipitación media de 356 mm, mayor que en Las Cardas y una temperatura media de 17°C. Además, dentro de las especies dominantes se encuentra *Acacia constricta* y *Flourensia cernia*, ambas del mismo género de dos de las especies dominantes presentes en Las Cardas.

Los altos valores del FCO<sub>2</sub> obtenidos durante el 2009 y el 2010, podrían deberse a que durante el 2008 las precipitaciones alcanzaron los 182 mm, valor considerablemente más alto que el periodo 2006 – 2007, donde los niveles de precipitación sólo llegaron a los 99 y 33 mm respectivamente. Generándose, un efecto acumulativo de reserva, provocando un aumento importante en el crecimiento de las plantas para el 2009, y por ende un aumento en la fijación de CO<sub>2</sub><sup>1</sup>.

Las especies en estudio se caracterizan por ser arbustos bajos muy esparcidos y con un estrato herbáceo anual relativamente denso, que alcanza su mayor crecimiento en primavera y se seca durante el verano (Gajardo, 1994). Al igual que las especies, las capas superficiales del suelo también se secan, por lo que disminuye la evaporación proveniente del suelo. Sin embargo, las plantas siguen extrayendo agua desde capas más profundas, lo que sumado a las condiciones más áridas del aire, permiten que haya un alto FCO<sub>2</sub> (Ledent, 2002). A medida que pasan los meses, el flujo disminuye hasta producirse una liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante la temporada de invierno, esto dada la presencia de precipitaciones, las que permiten la actividad microbiana en la superficie del suelo, producto de la caída de dosel ocurrida en el otoño (Huxman *et al.*, 2004).

### **Relaciones ambientales que explican el comportamiento de la eficiencia de uso del agua a escala ecosistémica y de los flujos que la componen**

Para entender mejor cuáles son los factores externos que podrían explicar las fluctuaciones de la EUA<sub>E</sub> a lo largo del tiempo, se realizó una serie de correlaciones entre las distintas variables ambientales en estudio y la EUA<sub>E</sub>. En el Cuadro 7 se observa que son la temperatura y el contenido de agua en el suelo las que mostraron una mayor relación con la variable de respuesta, ambas con un R<sup>2</sup> igual a 0,3. Más adelante, y por medio de gráficos, se explica a qué se debe esto. Además en el Apéndice VI se puede ver la dispersión de los puntos de cada correlación y en el Apéndice VII una regresión lineal múltiple que muestra

---

<sup>1</sup> Jorge Pérez Quezada, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Comunicación personal. Datos no publicados. (2011).

las variables que resultaron ser significativas en la ecuación, la que presentó un  $R^2$  igual a 0,41.

Cuadro 7. Correlación lineal entre variables ambientales y  $EUA_E$  [ $mg\ CO_2\ g^{-1}\ H_2O$ ].

Variables ambientales X	Variable Y	Y=a+bx		$R^2$	Error estándar
		a	b		
Cont. de agua en el suelo [ $m^3\ m^{-3}$ ]	$EUA_E$	30,410	-440,800	0,32	10,890
Temperatura [ $^{\circ}C$ ]	$EUA_E$	-21,130	2,576	0,33	10,760
Humedad relativa [%]	$EUA_E$	56,730	-0,522	0,11	12,400
Presión de vapor de agua [mbar]	$EUA_E$	-14,080	2,515	0,16	12,080
PAR [ $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]	$EUA_E$	2,825	0,032	0,18	11,990
Velocidad del viento [ $m\ s^{-1}$ ]	$EUA_E$	3,442	8,720	0,08	12,590

En las correlaciones presentadas en el Cuadro 7 no se consideró la precipitación, dado que ésta, por sí sola, no influye directamente sobre la fisiología de la planta, sino que lo hace a través de la disponibilidad hídrica presente en el suelo (Huang *et al.*, 1996). En la Figura 4 se observa que existe una relación directa entre ambas variables, en especial en los sistemas áridos o semiáridos, donde se presenta un gran dinamismo en las condiciones de humedad del suelo, pasando de  $0,03\ m^3\ m^{-3}$  a valores que superan los  $0,15\ m^3\ m^{-3}$  de manera inmediata. En ausencia de nuevos eventos de precipitación, el periodo de humedad dura sólo unos días, decayendo rápidamente el contenido de agua en el suelo, por lo que el tiempo para la actividad biológica es de corta duración (Barrera y Smith, 2009).

En ambientes semiáridos, el contenido de agua del suelo almacenada a partir de las precipitaciones, tanto en cantidad como en temporalidad, son los controladores principales de la actividad biológica en pastizales y arbustos, influyendo en los flujos de  $CO_2$  y  $H_2O$ , que potencialmente impactan en los valores de la  $EUA_E$  (Apéndice VI) (Emmerich, 2007).

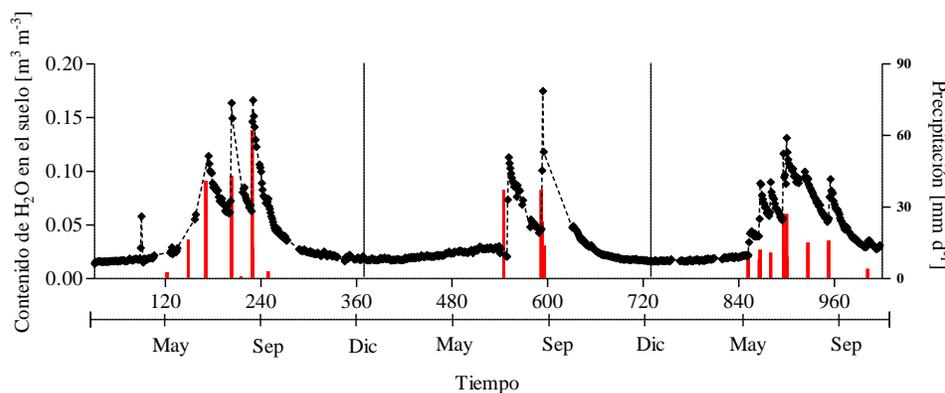


Figura 4. Precipitación y contenido de agua en el suelo diario medido entre febrero del 2008 y octubre del 2010.

En la Figura 4 se observa el tipo de condiciones por las que deben pasar las plantas, que corresponde a muy pocos días de precipitación al año, que además se encuentran

concentradas en la temporada de invierno. Esto deja sólo un pequeño periodo para que las plantas absorban agua.

Con el inicio de las precipitaciones hay una estimulación del intercambio gaseoso que se produce en el ecosistema, lo que se explica por dos medios. Según Arias (2001), luego de las primeras precipitaciones aumenta el contenido de agua en el suelo, produciéndose así una descomposición producto de la actividad microbiana, por lo que se genera una emanación de  $\text{CO}_2$  desde fuentes orgánicas e inorgánicas de carbono a la atmósfera. Un estudio realizado por Jarvis *et al.* (2007) sobre la influencia de las precipitaciones en la descomposición y posterior emisión de  $\text{CO}_2$  en suelos mediterráneos, muestra claramente esta influencia, al igual que si se compara la Figura 2a de  $\text{FCO}_2$  con la Figura 4. Posteriormente, viene un periodo de fijación de  $\text{CO}_2$ , el que se produce junto con el desarrollo del dosel. Sin embargo, esta actividad no resulta significativa en cantidad hasta un tiempo después, cuando se produce el desarrollo total del follaje (Emmerich, 2007).

Otra variable es la presión de vapor de agua ( $e_a$ ), que como ya se mencionó anteriormente, es explicado por la temperatura y la humedad relativa (Apéndice VI) (Urrestarazu, 2004). Las dos primeras tienen una relación directamente proporcional entre sí, mientras que la humedad relativa se comporta de manera inversa. Esto resulta lógico, ya que a mayor temperatura, menor será la humedad relativa en el aire, por lo que la diferencia de vapor de agua entre la atmósfera y la hoja será mayor, aumentando la velocidad de transpiración (Fernández y Johnston, 1986).

La temperatura y la  $e_a$  se comportan de manera similar en cuanto a oscilación, en comparación a la  $\text{EUA}_E$  y entre ellas, presentando valores entre 4 y 22 °C y 5 y 17 mbar respectivamente y con sus máximas durante el verano, al contrario de la humedad relativa que presenta sus mayores valores durante la temporada de invierno, alcanzando hasta un 100% de humedad relativa en el aire (Figura 5). Esto ocurre porque la  $\text{EUA}$  en las plantas está fuertemente influenciada por  $e_a$ , entonces al aumentar o disminuir ésta, habrá una reacción por parte de los estomas, los que entregan un porcentaje importante de  $\text{H}_2\text{O}$  a través de la transpiración de las hojas (Prieto *et al.*, s.a).

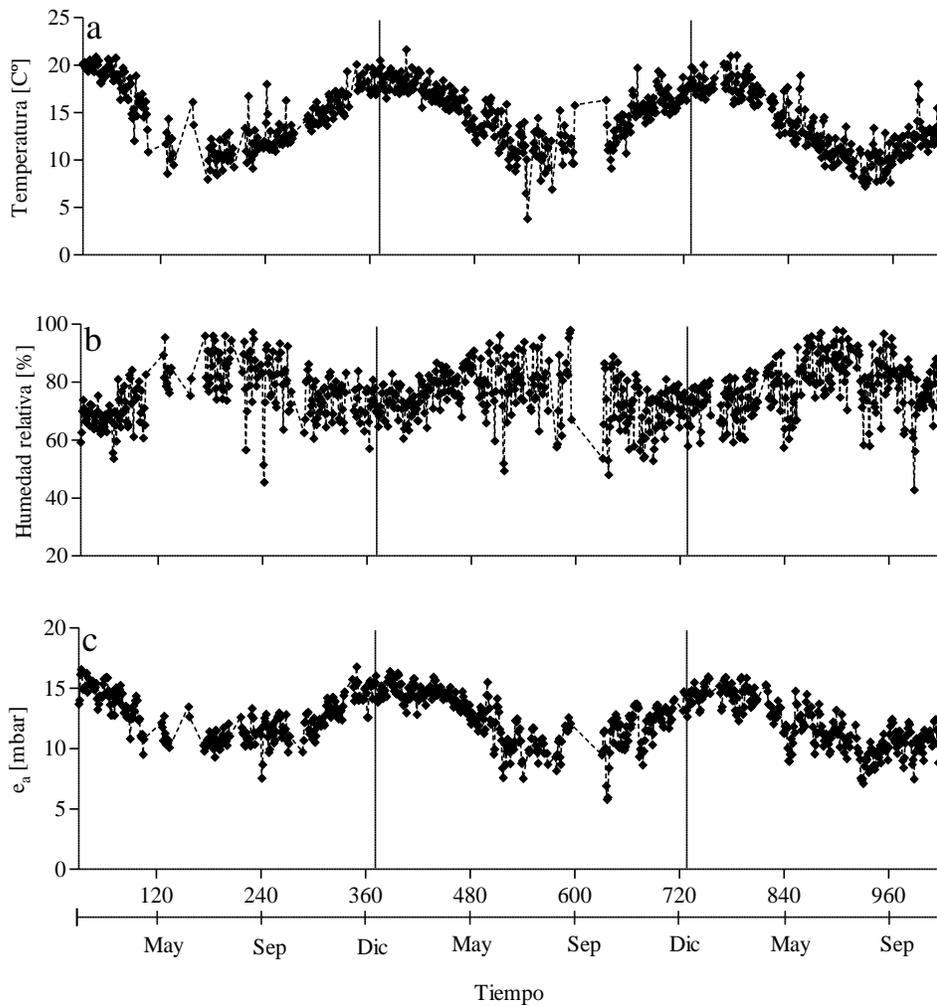


Figura 5. a) Temperatura del aire (T), b) Humedad relativa (HR) y c) Presión de vapor de agua ( $e_a$ ) diario medido entre febrero del 2008 y octubre del 2010.

Por otra parte, para que pueda ser llevada a cabo la fotosíntesis, es necesario que la temperatura se encuentre dentro de cierto rango. Para una producción máxima, la temperatura debe encontrarse entre 20-30 °C, aunque puede producirse igual dentro de un rango mayor, que va desde 0 a 50 °C (Labarthe y Pelta, s.a.). Hay que tener en consideración que la temperatura presentada en la Figura 5a, corresponde a un promedio de 72 repeticiones medidas a lo largo de 24 horas, por lo que durante el día las temperaturas medidas eran mayores, encontrándose dentro del rango señalado, y son los bajos valores obtenidos durante la noche los que disminuyen la temperatura media presentada en el gráfico.

La PAR corresponde a la radiación que es capaz de producir actividad fotosintética en las plantas y constituye alrededor del 50% de la radiación solar total (Bariogli, 2006; Iglesias y Muñoz, 2007). Al aumentar ésta, también aumentará la tasa fotosintética, aumentando así la  $EUA_E$  (Apéndice VI) (Emmerich, 2007; Labarthe y Pelta, s.a). La radiación solar, al igual

que la PAR varía dependiendo la época del año y la cobertura de nubes (Grossi *et al.*, 2004).

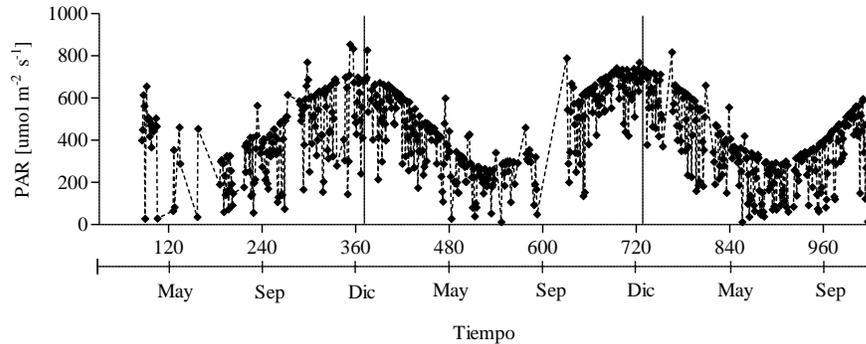


Figura 6. Radiación fotosintéticamente activa diaria medida entre febrero del 2008 y octubre del 2010.

En la Figura 6 se observa que los valores obtenidos por la estación Bowen Ratio para la PAR fluctúan entre 10 y 900  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , presentando amplias variaciones incluso entre días contiguos, atribuyendo esto a la cobertura de nubes. Aun así, se observa una tendencia estacional que presentó los valores más altos durante el verano.

En la Figura 7 se presentan los datos obtenidos para la velocidad del viento, que fluctúan entre 0 y 3  $\text{m s}^{-1}$ . Sus máximas ocurren durante los meses más cálidos, disminuyendo paulatinamente hasta llegar al invierno.

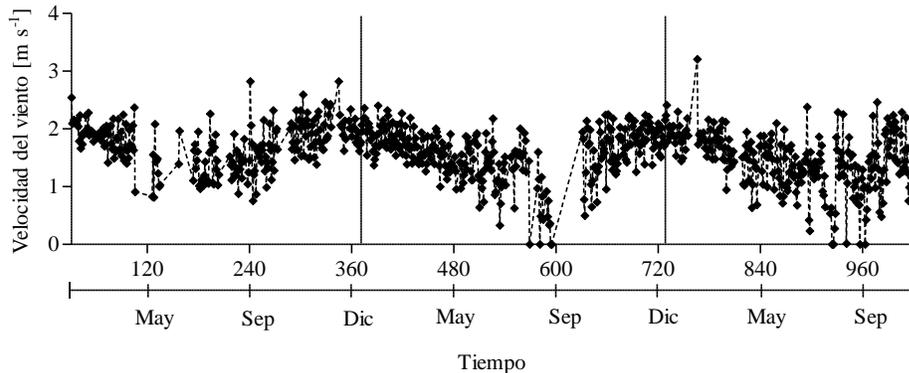


Figura 7. Velocidad del viento diaria medida entre febrero del 2008 y octubre del 2010.

La intensidad del viento no tiene un efecto directo sobre la apertura estomática, pero sí sobre la transpiración, por efecto del gradiente que existe entre la atmósfera y la hoja (Apéndice VI). Debido a esto, la intensidad del viento aumenta la transpiración al renovar rápidamente las capas de aire que se encuentran en contacto directo con la hoja (Fernández y Johnston, 1986). Si se compara la Figura 2b de  $\text{FH}_2\text{O}$  con la Figura 7 se puede ver que los picos de ambas figuras no coinciden, por lo que la velocidad del viento en este caso no parece tener mayor influencia sobre el  $\text{FH}_2\text{O}$ . En cuanto a la interacción de  $\text{FCO}_2$  y

velocidad del viento la información es escasa, aun así Retuerto y Woodward (1993) hallaron que a menor velocidad del viento las concentraciones de  $\text{CO}_2$  eran proporcionalmente mayores, esto debido a que el movimiento del  $\text{CO}_2$  es más lento, generándose una resistencia a la difusión desde la atmosfera hacia la superficie foliar de la planta. A simple vista las oscilaciones de la Figura 2a de  $\text{FCO}_2$  parecen tener mayor similitud con las oscilaciones de la velocidad del viento, aun así, esta variable obtuvo el menor  $R^2$  en las correlaciones lineales realizadas entre las distintas variables ambientales y la  $\text{EUA}_E$  (Cuadro 7).

## CONCLUSIONES

Dentro de los factores analizados, solamente sector, especies y la interacción entre ambas resultó tener un efecto significativo sobre la  $EUA_F$  de las especies estudiadas. Entre sectores, el resultado obtenido puede atribuirse, por un lado, a las características externas que presenta el lugar – ya que la toma de datos se realizó en distintos días – o a la presencia de AS en el sector forestado. Aun así, dentro de la toma de muestras de un mismo sector, las condiciones ambientales se mantienen, por lo que las mediciones entre especies cumplen con las mismas condiciones tanto externas como internas.

Al contrario de lo esperado, *Acacia saligna* no obtuvo los mayores valores  $EUA_F$ , incluso dentro de un mismo sector (SF), si no que fue *Flourensia thurifera* la más eficiente, aun así ambas especies no presentaron diferencias significativas entre sus medias. En términos generales, en ambos sectores las especies mantienen sus características en cuanto a eficiencia, siendo *Flourensia thurifera* y *Gutierrezia resinosa* la más y la menos eficiente respectivamente.

A nivel de ecosistema, el comportamiento de la  $EUA_E$  varía a lo largo del tiempo – determinado principalmente por el  $FCO_2$  – tanto de manera anual, como estacional, siendo esta última determinante en la oscilación de los resultados. Esto se debe principalmente a los factores de temperatura y contenido de agua en el suelo. Durante la temporada de verano se presentan los mayores valores de  $EUA_E$ , debido a que hay una mayor fijación del  $CO_2$  en el sistema, mientras que en la temporada de invierno ésta disminuye ya que las precipitaciones, y por ende el contenido de agua en el suelo, estimulan la liberación del  $CO_2$  a la atmósfera por medio de la respiración microbiana.

## BIBLIOGRAFÍA

Arias, A. 2001. Suelos tropicales. Editorial Universal Estatal a Distancia, San José, Costa Rica. 166p.

Azcón-Bieto, J. y M. Talón. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. Edición Mc Graw Hill- Interamericana de España, segunda edición. Universidad de Barcelona. España.

Aznar, J. 2002. Recursos mundiales. La gente y los ecosistemas: se deteriora el tejido de la vida. UNEP (united nations environment programme). Editorial Ecoespaña. Madrid, España. 389p.

Barceló, J., G. Nicolás, B. Sabater y R. Sánchez. 1990. Fisiología vegetal. Ediciones Pirámide, S.A., Madrid, España. 823p.

Bariogli, C. 2006. Diccionario de las ciencias agropecuarias. Editorial Brujas. Córdoba, Argentina. 496p.

Barrera, E. y W. Smith. 2009. Perspectives in biophysical plant ecophysiology. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. Delegación Coyoacán. México. 397p.

Bast, J. y C. Bast. 2009. Climate Change Reconsidered. NIPCC (nongovernmental international panel on climate change). Disponible en: <http://www.climatechangereconsidered.org/>. Leído el 29 de marzo del 2010.

Benites, J., D. Saintraint y K. Morimoto. 1994. Degradación de tierras y producción agrícola en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay. Erosión de suelos en América Latina. FAO, Santiago, Chile. 83–116p.

Bolstad, P., K. Davis, J. Martin, B. Cook y W. Wang. 2004. Component and whole-system respiration fluxes in northern deciduous forests. *Tree Physiol.* 24: 493–504p.

Campbell Scientific, Inc. 2005. Bowen ratio system. Instruction manual. Disponible en: <http://www.campbellsci.com/documents/manuals/bowen.pdf>. Leído el 7 de Mayo del 2011.

Delpiano, C. 2009. Reservorios de carbono en una pradera de la zona árida mediterránea de Chile en condiciones naturales y forestales con *Acacia Saligna* Labill. H.L. Wendl. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 45p.

Dukes, J. 2000. Will the increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration affect the success of invasive species. Disponible en:

[http://globalecology.stanford.edu/DGE/Dukes/Dukes\\_CO2\\_Invasion.pdf](http://globalecology.stanford.edu/DGE/Dukes/Dukes_CO2_Invasion.pdf). Leído el 13 de Junio del 2010.

Emmerich, W. 2007. Ecosystem Water Use Efficiency in a Semiarid Shrubland and Grassland Community. *Rangeland Ecology and Management*. 60 (5): 464–470.

Fernández, E. y F. Camacho. 2005. Concepto y aplicaciones prácticas en horticultura y semillas. Eficiencia de uso del agua. *Revista Horticultura Global*. Disponible en: [http://www.horticom.com/revistasonline/extra05/E\\_Fernandez\\_F\\_Camacho.pdf](http://www.horticom.com/revistasonline/extra05/E_Fernandez_F_Camacho.pdf). Leído el 14 de Agosto del 2010.

Fernández, G. y M. Johnston. 1986. *Fisiología vegetal experimental*. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura (IIRCA). San José, Costa Rica.

Gajardo, R. 1994. *La vegetación natural de Chile*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 165p.

Gil-Marín, J., R. Rodríguez, D. Jasso-Cantú y A. Zermeño. s.a. Resistencia estomática, transpiración y potencial hídrico en sábila con diferentes condiciones ambientales. *Terra Latinoamericana*. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/573/57311103007.pdf>. Leído el 23 de Mayo del 2010.

Grossi, H., R. Righini y O. Dursi. 2004. Primeras mediciones de la radiación fotosintéticamente activa en San Miguel, provincia de Buenos Aires. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 8 (2): 13–17.

Herrera, A., M. Dolores, F. Rengifo y W. Tezara. 2001. Efecto de la concentración elevada de CO<sub>2</sub> sobre la fotosíntesis en especies tropicales. *INCI*. 26 (10): 469–471.

Houghton, J., L. Meira Filho, B. Callander, N. Harris, A. Kattenberg y K. Maskell. 1996. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Cambridge University. 572p .

Huang, J., H. Van den Dool y K. Georgai. 1996. Analysis of Model-Calculated Soil Moisture over the United States and Applications to Long-Range Temperature Forecasts. *Journal of Climate*, 1350–1362.

Huxman, T., M. Smith y P. Fay. 2004. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*. 429: 651–654.

Iglesias, N. y A. Muñoz. 2007. Comparación de la transmisión de la radiación fotosintéticamente activa en invernaderos del norte de la Patagonia. *Horticultura Argentina*. 26: 10–16.

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor y H. Miller. 2007. IPCC: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science*

Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jarvis, P., A. Rey, C. Petsikos, L. Wingate, M. Rayment, J. Pereira, J. Banza, J. David, F. Miglietta, M. Borguetti, G. Manca y R. Valentini. 2007. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: the “Birch effect”. *Tree Physiology*. 27: 929–940.

Kimball, B. 1983. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agronomy Journal*. 75: 779–789.

Labarthe, F. y H. Pelta. s.a. Introducción básica a la fotosíntesis y características de especies forrajeras megatérmicas. Estación experimental agropecuaria Bordenave. Disponible en: [http://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/pasturas\\_cultivadas\\_megatermicas/143-caracteristicas\\_forrajeras\\_megatermicas.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_megatermicas/143-caracteristicas_forrajeras_megatermicas.pdf). Leído el 19 de Septiembre del 2010.

Ledent, J. 2002. Déficit hídrico y crecimiento de las plantas: Respuestas al déficit hídrico. Comportamiento morfofisiológico. Universidad católica de Louvain. Facultad de ciencias agronómicas. Bélgica.

Lema, A. 1998. Eficiencia en el uso del agua de tres especies con aptitud forrajera para el secano árido de la cuarta región de Chile. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias agronómica. Santiago, Chile. 74p.

Llambías, M.J. 2002. Respiración del suelo en un matorral de la región bioclimática mediterránea desértica – oceánica de Chile en condiciones naturales y forestales con *Acacia saligna*. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias agronómicas. Santiago, Chile. 35p.

López, J., N. Riaño y Y. López. 2001. Características fotosintéticas de cinco especies forestales. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile.

Medrado, H., J. Bota, J. Cifre, J. Flexas, M. Ribas-Carbó y J. Gulías. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. Investigaciones Geográficas. Universidad de Alicante. Instituto Universitario de Geografía. 63–84p.

Monson, R., M. Prater, J. Hu, S. Burns, J. Sparks, K. Sparks y L. Scott-Denton. 2009. Tree species effects on ecosystem water-use efficiency in a high-elevation, subalpine forest. Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of Colorado, USA. 162: 491–504.

Mooney, H. y J. Kummerow. 1971. Comparative water economy of representative evergreen sclerophyll and drought deciduous shrubs of Chile. *Botanical Gazette*. 132 (3): 245.

Mora, F., R. Meneses y S. Perret. 2002. Potencialidades y limitantes de *Acacia Saligna* en la región de Coquimbo, Chile; y su relación con los ecosistemas de clima Mediterráneo. *Avances en Producción Animal*. 27 (1–2). Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Producción Animal, Universidad de Chile.

Nagler, P., E. Glenn, H. Kim, W. Emmerich, R. Scott, T. Huxman y A. Huete. 2007. Relationship between evapotranspiration and precipitation pulses in a semiarid rangeland estimated by moisture flux towers and MODIS vegetation indices. *Journal of arid Environments*. 70: 443–462.

Nativ, R., J. Ephrath, P. Berliner y Y. Saranga. 1999. Drought resistance and water use efficiency in *Acacia saligna*, *Australian Journal Botany*. 47 (4): 577–586.

Parra, A. y J. Hernández. 2007. Fisiología pos cosecha de frutas y hortalizas. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. 67p.

Pérez, J.F. 1996. Elaboración de un modelo para la determinación de la capacidad de sustentación de terrenos de pastoreo de la región árida chilena. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo, Universidad de Chile. 122p.

Pérez-Quezada, J.F., N.Z. Saliendra, W.E. Emmerich y E.A. Laca. 2007. Evaluation of statistical protocols for quality control of ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes. *Journal of the Royal Statistical Society A*. 170 (Part 1): 213–230.

Prieto, J., E. Lebon y H. Ojeda. s.a. Respuesta estomática de variedades de vid al estado hídrico del suelo y al déficit de presión de vapor de agua. Disponible en: [http://www.inta.gov.ar/mendoza/V\\_Jornadas/Ponencias/Prieto.pdf](http://www.inta.gov.ar/mendoza/V_Jornadas/Ponencias/Prieto.pdf). Leído el 18 de Septiembre del 2010.

Retuerto, R y F. Woodward. 1992. Effects of windspeed on the growth and biomass allocation of white mustard *Sinapis alba* L. *Oecologia* 92:113–123.

Schulze, E. 1986. Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and the soil. *Rev. Plant Physiol*. 37: 247–274.

Silva, H. y E. Acevedo. 1995. Eficiencia en el uso del agua en diez taxa de *Opuntia* introducidas en la región mediterránea de Chile. Departamento de producción animal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. Chile.

Tian, H., C. Chen, M. Liu, C. Zhang, G. Sun, C. Lu, X. Xu, W. Ren, S. Pan y A. Chappelka. 2010. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and

water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895–2007. *Forest Ecology and Management*. 259: 1311–1327.

Urrestarazu, M. 2004. *Tratado de cultivos sin suelo*. Edición Mundo-Prensa Libros s.a. Madrid, España. 3ª Edición. 915p.

Volk, M. 1948. significance of moisture translocation from soil zones of low moisture tension by plant roots. *Agronomy journal*. 39: 93–106.

Wan, C., R. Sosebee y B. Mcmichael. 1993. soil water extraction and photosynthesis in *Gutierrezia sarothrae* and *sparabolus cryptandrus*. *Journal of Range Management*. 46: 425–430. Disponible en: <http://www.jstor.org/pss/4002661>. Leído el 13 de Agosto del 2010.

## APÉNDICE

### Apéndice I. Resultados obtenidos con Test de Tukey para la variable dependiente $EUA_F$ según el factor sector, especie y sector x especie

Cuadro 1. Estimación de medias según sector [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].

Sector	Media	Error estándar	Inter. confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
SF	3,602	0,286	3,006	4,197
SN	5,984	0,247	5,468	6,500

Cuadro 2. Comparación múltiple según sector [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].

(I) Sector	(J) Sector	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Inter. confianza 95%	
					Límite inferior	Límite superior
SF	SN	-2,383	0,378	0,000 *	-3,171	-1,595
SN	SF	2,383	0,378	0,000 *	1,595	3,171

\* Variables con diferencias significativas.

Cuadro 3. Test univariante para la variable dependiente  $EUA_F$  [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].

	Suma de cuadrados	df	Media al cuadrado	F	Sig.
Contraste	38,930	1	38,930	39,781	0,000
Error	19,572	20	0,979		

Cuadro 4. Estimación de medias según especie [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].

Especie	Media	Error estándar	Inter. confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
FT	6,651	0,267	6,093	7,208
GR	2,935	0,267	2,378	3,493

Cuadro 5. Comparación múltiple según especie [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].

(I) Especie	(J) Especie	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Inter. confianza 95%	
					Límite inferior	Límite superior
FT	GR	3,715	0,378	0,000 *	2,927	4,503
GR	FT	-3,715	0,378	0,000 *	-4,503	-2,927

\* Variables con diferencias significativas.

Cuadro 6. Test univariante para la variable dependiente  $EUA_F$  [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ].

	Suma de cuadrados	df	Media al cuadrado	F	Sig.
Contraste	94,648	1	94,648	96,717	0,000
Error	19,572	20	0,979		

Cuadro 7. Estimación de medias según sector y especie [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ].

Sector	Especie	Media	Error estándar	Inter. confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
SF	FT	5,050	0,404	4,208	5,892
	GR	2,153	0,404	1,311	2,996
SN	FT	8,251	0,350	7,522	8,981
	GR	3,718	0,350	2,988	4,447

Cuadro 8. Comparación múltiple según sector y especie [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ].

Sector	(I) Especie	(J) Especie	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Inter. confianza 95%	
						Límite inferior	Límite superior
SF	FT	GR	2,897	0,571	0,000 *	1,705	4,088
	GR	FT	-2,897	0,571	0,000 *	-4,088	-1,705
SN	FT	GR	4,534	0,495	0,000 *	3,502	5,566
	GR	FT	-4,534	0,495	0,000 *	-5,566	-3,502

\* Variables con diferencias significativas.

Cuadro 9. Test univariante para la variable dependiente  $EUA_F$  [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ].

Sector		Suma de cuadrados	df	Media al cuadrado	F	Sig.
SF	Contraste	25,172	1	25,172	25,722	0,000
	Error	19,572	20	0,979		
SN	Contraste	82,220	1	82,220	84,017	0,000
	Error	19,572	20	0,979		

## Apéndice II. Imágenes del área de estudio



Figura 1. Sector natural.



Figura 2. Sector forestado con *Acacia saligna*.

**Apéndice III. Descripción estadística de la variable dependiente  $EUA_F$  según el Análisis de varianza para el factor tratamiento**

Cuadro 10. ANOVA para la variable dependiente  $EUA_F$  [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].

Tratamiento	Media	Desv. estándar	N
AS_SF	4,618	0,959	6
FL_SF	5,050	0,684	6
GR_SF	2,153	0,883	6
FL_SN	8,251	1,377	8
GR_SN	3,718	0,515	8
Total	4,902	2,289	34

Cuadro 11. ANOVA para la variable dependiente  $EUA_F$  [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ].

Variable	Suma de cuadrados	df	Media al cuadrado	F	Sig.
Modelo	146,909	4	36,727	41,030	0,000 *
Intercepción	754,645	1	754,645	843,054	0,000 *
Tratamiento	146,909	4	36,727	41,030	0,000 *
Error	25,959	29	0,895		
Total	989,992	34			
Total corregido	172,868	33			

$R^2=0,85$

\* Variables con diferencias significativas.

**Apéndice IV. Resultados obtenidos con Test de Tukey para la variable dependiente  $EUA_F$  según tratamiento**

Cuadro 12. Estimación de medias según tratamiento [ $\text{mmol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ ].

Tratamiento	Media	Error estándar	Inter. confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
AS_SF	4,618	0,386	3,828	5,408
FT_SF	5,050	0,386	4,260	5,840
GR_SF	2,153	0,386	1,363	2,943
FT_SN	8,251	0,335	7,567	8,935
GR_SN	3,717	0,335	3,033	4,402

Cuadro 13. Comparación múltiple según tratamiento [mmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O].

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Inter. confianza 95%	
					Límite inferior	Límite superior
AS_SF	FT_SF	-0,432	0,546	0,931	-2,019	1,156
	GR_SF	2,465	0,546	0,001 *	0,877	4,053
	FT_SN	-3,633	0,511	0,000 *	-5,118	-2,148
	GR_SN	0,901	0,511	0,413	-0,584	2,386
FT_SF	AS_SF	0,432	0,546	0,931	-1,156	2,019
	GR_SF	2,897	0,546	0,000 *	1,309	4,484
	FT_SN	-3,201	0,511	0,000 *	-4,687	-1,716
	GR_SN	1,333	0,511	0,095	-0,153	2,818
GR_SF	AS_SF	-2,465	0,546	0,001 *	-4,053	-0,877
	FT_SF	-2,897	0,546	0,000 *	-4,484	-1,309
	FT_SN	-6,098	0,511	0,000 *	-7,583	-4,613
	GR_SN	-1,564	0,511	0,035 *	-3,049	-0,079
FT_SN	AS_SF	3,633	0,511	0,000 *	2,148	5,118
	FT_SF	3,201	0,511	0,000 *	1,716	4,687
	GR_SF	6,098	0,511	0,000 *	4,613	7,583
	GR_SN	4,534	0,473	0,000 *	3,159	5,909
GR_SN	AS_SF	-0,901	0,511	0,413	-2,386	0,584
	FT_SF	-1,333	0,511	0,095	-2,818	0,153
	GR_SF	1,564	0,511	0,035 *	0,079	3,049
	FT_SN	-4,534	0,473	0,000 *	-5,909	-3,159

\* Variables con diferencias significativas.

## Apéndice V. Descripción y caracterización de las especies dominantes presentes en el área de estudio

Nombre común: Acacia

Nombre científico: *Acacia saligna* (Labill.) H.L.Wendl

Familia: Fabaceae

### Distribución y hábitat:

*Acacia saligna* es una leguminosa siempre verde originaria del Suroeste de Australia, la que fue introducida en Chile a comienzos de la década del 60.

En Chile se ubica principalmente en la zona norte, específicamente en la zona costera desde la región de Coquimbo hasta la de Valparaíso. Este arbusto ha sido usado ampliamente para la forestación de zonas áridas o semiáridas. Su rango de temperatura va desde los 23 y 36°C en verano, hasta los 4 y 9°C en invierno, no tolera las heladas, y su distribución altitudinal es desde el nivel del mar, hasta los 300 m.s.n.m. Puede desarrollarse en hábitat con escasa precipitación, alcanzando una máxima de 250 mm anuales. Se encuentra principalmente en planicies costeras arenosas.

### **Características:**

Se caracteriza por ser una especie multipropósito, utilizada como fuentes de forraje, energía y de recuperación de suelos. A su vez, tolera la sequía, se adapta a suelos salinos, poco profundos, por lo que resulta atractivo para la recuperación de suelos.

Arbusto de copa abundante y densa de 2 a 5 m de altura, que florece durante la primavera. Es muy resistente a la sequía y de rápido crecimiento.

Nombre común: Incienso, maravilla del campo

Nombre científico: *Flourensia thurifera* (Mol.) DC.

Familia: Asteraceae

### **Distribución y hábitat:**

Especie endémica, no muy frecuente que se ubica entre las regiones de Coquimbo y del Biobío. Altitudinalmente se puede encontrar en valles al interior, cordillera de la costa de entre 500 y 2000 m.s.n.m y en la costa desde el nivel del mar, hasta 500 m.s.n.m. Se desarrolla en sectores con baja precipitación, alcanzando una máxima de 800 mm anuales, concentradas en el invierno.

### **Características:**

Especie de ambientes cálidos, que puede resistir las heladas de manera ocasional, y con temperaturas no inferiores a los 5°C. Es fácil de cultivar, con un tamaño medio de 1,5 metros. Además pertenece, al igual que *Acacia saligna*, al grupo metabólico C<sub>3</sub>.

Nombre común: Pichanilla

Nombre científico: *Gutierrezia resinosa* (H. & A.) Blake

Familia: Asteraceae

### **Características:**

Especies de tejidos lignificados o leñosos cuyo tamaño no pasa los dos metros de altura. Normalmente presentan varios troncos o ramas principales. En zonas degradadas *Gutierrezia resinosa* se hace especie dominante. Esta pertenece al grupo metabólico C<sub>3</sub>, al igual que el 85% de las plantas superiores, el que se diferencia de C<sub>4</sub> y CAM por la manera en la que incorpora el CO<sub>2</sub>.

## Apéndice VI. Correlación entre la $EUA_E$ y las variables ambientales en estudio

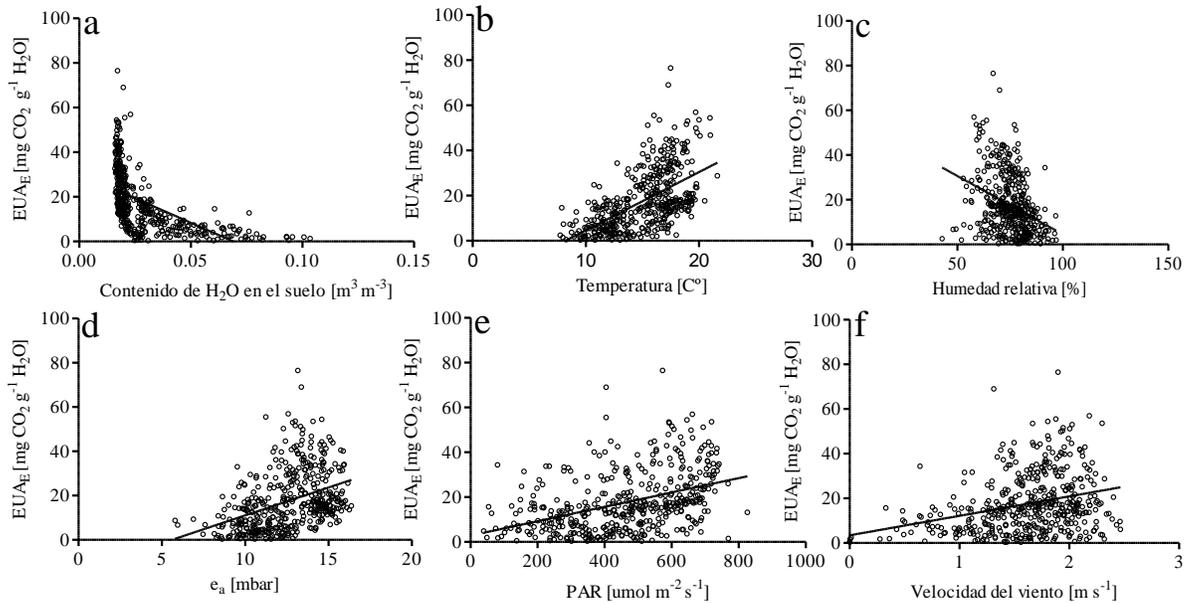


Figura 3. Diagramas de dispersión entre: a)  $EUA_E$  y contenido de agua en el suelo, b)  $EUA_E$  y temperatura del aire, c)  $EUA_E$  y humedad relativa, d)  $EUA_E$  y  $e_a$ , e)  $EUA_E$  y PAR y f)  $EUA_E$  y velocidad del viento.

## Apéndice VII. Regresión lineal múltiple para la variable dependiente $EUA_E$

Cuadro 14. Resumen del modelo.

R	$R^2$	$R^2$ corregido	Estimación de error estándar
0,635 <sup>a</sup>	0,403	0,396	10,259

a: Presión de vapor de agua, PAR, Vel. del viento, Cont. de agua en el suelo y Temperatura.

Cuadro 15. Análisis de varianza para la variable dependiente  $EUA_E$  [mg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O].

Modelo	Suma de cuadrados	df	Medias cuadradas	F	Sig.
Regresión	31337,370	5	6267,474	59,547	0,000 *
Residual	46416,038	441	105,252		
Total	77753,408	446			

Cuadro 16. Coeficiente de regresión lineal para la variable dependiente  $EUA_E$  [ $mg\ CO_2\ g^{-1}\ H_2O$ ].

Modelo	Coef. no estandarizado		Coef. Estandarizado	t	Sig.
	B	Error típico	Beta		
Constante	12,534	5,606		2,236	0,026 *
Presión de vapor de agua	-0,990	0,437	-0,155	-2,268	0,024 *
PAR	0,010	0,005	0,127	2,160	0,031 *
Vel. del viento	-5,980	1,567	-0,203	-3,816	0,000 *
Cont. de agua en el suelo	-281,255	44,290	-0,360	-6,350	0,000 *
Temperatura	2,065	0,412	0,461	5,017	0,000 *

\* Variables significativas ( $p < 0,05$ ).