

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

Memoria de Título

**RESPIRACIÓN DEL SUELO EN UN MATORRAL DE LA REGIÓN
BIOCLIMÁTICA MEDITERRÁNEA DESÉRTICO-OCEÁNICA DE CHILE EN
CONDICIÓN NATURAL Y FORESTADO CON *ACACIA SALIGNA***

MARÍA JESÚS DEL SOL LLAMBÍAS UNDA

SANTIAGO, CHILE

2009

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE AGRONOMÍA

Memoria de Título

**RESPIRACIÓN DEL SUELO EN UN MATORRAL DE LA REGIÓN
BIOCLIMÁTICA MEDITERRÁNEA DESÉRTICO-OCEÁNICA DE CHILE EN
CONDICIÓN NATURAL Y FORESTADO CON *ACACIA SALIGNA***

**SOIL RESPIRATION IN A SHRUBLAND OF THE MEDITERRANEAN
DESERTIC-OCEANIC BICLIMATIC REGION OF CHILE IN NATURAL
CONDITION AND AFFORESTED WITH *ACACIA SALIGNA*.**

MARÍA JESÚS DEL SOL LLAMBÍAS UNDA

SANTIAGO, CHILE

2009

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE AGRONOMÍA

**RESPIRACIÓN DEL SUELO EN UN MATORRAL DE LA REGIÓN
BIOCLIMÁTICA MEDITERRÁNEA DESÉRTICO-OCEÁNICA DE CHILE EN
CONDICIÓN NATURAL Y FORESTADO CON *ACACIA SALIGNA*.**

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

MARÍA JESÚS DEL SOL LLAMBÍAS UNDA

PROFESORES GUÍAS	CALIFICACIONES
Sr. Jorge Pérez Q. Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Ph.D.	7,0
Sr. Nicolás Franck B. Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Ph.D.	7,0
PROFESORES EVALUADORES	
Sr. Edmundo Acevedo H. Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Ph.D.	7,0
Sr. Juan Manuel Uribe M. Ingeniero Agrónomo.	7,0

SANTIAGO, CHILE

2009

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis papas, Jorge y Carolina, por todo el apoyo y compromiso que siempre han tenido conmigo.

A mis profesores guías, los señores Jorge Pérez y Nicolás Franck, por permitirme realizar este trabajo de investigación. Por el tiempo que dedicaron a resolver mis dudas y encausar mis ideas, corrigiendo mis desaciertos y apoyando aquellas que vislumbraban buen fin.

A la señora Claudia Torres, administradora del Campo Experimental Agronómico Las Cardas, por recibirme siempre tan amablemente, por su gentileza y dedicación de acompañarme en todas las mediciones, especialmente aquellas que por la hora o el cansancio resultaron ser las más agotadoras, pero que sin duda, gracias a su compañía resultaron ser mucho más abordables.

A mi amiga Josefina Perona, quien generosamente sacrificó parte de sus vacaciones para acompañarme en la primera campaña de medición, la cual por ser la primera tenía esa mezcla de aventura pero a la vez, la dificultad de enfrentarse a lo desconocido. Gracias Jo porque tu ayuda permitió que la primera campaña fuese un éxito, y con esa experiencia tuve más confianza y desenvoltura para afrontar las siguientes campañas.

Agradezco a todos aquellos que gentilmente me han ayudado, especialmente a mis amigas y amigos de la carrera de ingeniería en recursos naturales renovables.

A todos ustedes, infinitamente muchas gracias!!!.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo General	6
Objetivos Específicos.....	6
MATERIALES Y MÉTODO	7
Características de la zona de estudio.....	7
Equipo de medición.....	9
Procedimientos previos a la campaña de medición de respiración de suelo.....	10
Especificaciones técnicas y funcionamiento del equipo LI-8100.....	11
Programa de medición de la respiración del suelo y otras variables ambientales	13
Tratamiento de los datos	13
Detección de valores anómalos o fuera de rango.....	13
Factores ambientales relacionados a la variabilidad diaria de la respiración del suelo	14
Cuantificación del flujo de CO ₂ en el suelo	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
Factores ambientales que explican la variabilidad diaria de la respiración del suelo.....	17
Cuantificación del flujo de CO ₂ en el suelo	24
CONCLUSIONES	28
BIBLIOGRAFÍA	29
APÉNDICES.....	35
Apéndice 1. Ponderaciones empleadas para la estimación de la respiración de suelo diaria de cada condición.....	35
Apéndice 2. Variación temporal de los factores ambientales	35

RESUMEN

El suelo es el mayor reservorio de carbono en los ecosistemas terrestres. La respiración del suelo (Rs) corresponde a un importante flujo de transferencia de dióxido de carbono (CO₂) desde el suelo hacia la atmósfera. La Rs está compuesta por la respiración de las raíces y la respiración de la biota del suelo (descomposición de la materia orgánica). Se caracteriza por tener variaciones temporales y espaciales debido a la interacción de factores biológicos, físicos y químicos.

La investigación fue realizada en el Campo Experimental Agronómico Las Cardas durante los días julianos (DJ): 28-31, 56-59, 91-94, 126-129 del año 2008, en un matorral desértico costero de *Flourensia thurifera*. La finalidad de este estudio fue medir y comparar la Rs del matorral en un sitio de condición natural y otro forestado con *Acacia saligna*.

Las mediciones de Rs fueron realizadas por el método de cámara cerrada dinámica con el equipo LI-8100 Automated Soil CO₂ Flux System (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA) conectado a una cámara de 20 cm de diámetro y provisto de sensores de temperatura y humedad de suelo.

Los modelos empíricos para estimar la Rs han sido asociados a la temperatura de suelo y humedad de suelo, sin embargo los resultados obtenidos en esta investigación, indicaron que durante un año seco, la Rs fue explicada mejor por la temperatura del aire y humedad relativa.

La Rs fue baja en ambos sitios, pudiendo deberse principalmente a la sequía que afectaba a la región. El sitio de matorral natural presentó significativamente mayores flujos que el sitio forestado, lo cual estaría relacionado a la mayor superficie de suelo desnudo, al menor contenido de materia orgánica en el suelo y al bajo prendimiento y sobrevivencia de *A. saligna*. Se observó en ambos sitios que la Rs disminuyó con los DJ, siendo el quiebre más evidente el que se produjo entre las campañas de los DJ 56-59 y 91-94, coincidentes con el cambio de estación de verano a otoño. Como la investigación fue realizada sólo en una fracción de la temporada seca, se recomienda realizar observaciones en otras épocas del año.

Palabras claves: Flujo CO₂, Variación estacional.

ABSTRACT

The main objective of this investigation was to compare soil respiration in a shrubland of the Mediterranean Desertic-Oceanic bi climatic region of Chile in natural condition and afforested with *Acacia saligna*.

The specific objectives were:

- Identify the major environmental factors controlling of daily variability of soil respiration.
- Quantify soil CO₂ efflux during dry season.

The results show that in a dry year, soil respiration was related to temperature and relative humidity.

Soil respiration was low in both sites, mainly due to the drought affecting the region. The natural site higher CO₂ fluxes than the afforested one ($p < 0,05$), probably as a result of surface of bare soil, a lower content of organic matter in the soil and to lower growth rate and survival of *A. saligna*. In both sites, soil respiration decreased as Julian Day increased. This was most evident between measurements of dates 2 and 3, coinciding with the seasonal change from summer to autumn. This research was carried out in part of the dry season, therefore it is advisable to monitor other seasons.

Keywords: soil CO₂ efflux, seasonal variation.

INTRODUCCIÓN

El carbono (C) en la Tierra se encuentra en cuatro grandes reservorios: océano (38.000 petagramos [Pg]), suelo (7.500 Pg), atmósfera (760 Pg) y vegetación (560 Pg); éstos se encuentran interconectados y la circulación de C entre ellos corresponde al proceso conocido como ciclo del carbono (Lal, 2004). El C de la atmósfera es capturado como dióxido de carbono (CO₂) en los ecosistemas terrestres a través del proceso de fotosíntesis y retorna a la atmósfera como CO₂, principalmente mediante el proceso de respiración del ecosistema (Re). El balance entre lo absorbido y liberado determina si un ecosistema está actuando como fuente o sumidero de C (Pumpanen *et al.*, 2004; Trumbore, 2006). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2000) sostiene que las actividades antrópicas alteran el nivel de C presente en los reservorios y afecta también el flujo de C entre ellos, principalmente debido al cambio de uso de la tierra y a la tala de bosques.

A nivel de ecosistema terrestre, el suelo tiene un importante rol en el balance global de C y en el ciclo del mismo porque es el reservorio que contiene más cantidad de C, retenido en forma orgánica e inorgánica, y porque contribuye con uno de los más importantes flujos de transferencia de C hacia la atmósfera (Figura 1). Este proceso es denominado respiración de suelo (Rs) y corresponde a la fracción subterránea de la Re (Post y Kwon, 2000; Yim *et al.*, 2003; Jassal *et al.*, 2007; Carbone y Vargas, 2008). La Rs está compuesta por la respiración autótrofa (respiración de las raíces) y la respiración heterótrofa (respiración de los microorganismos presentes en el suelo o mineralización de la materia orgánica) (Nakadai *et al.*, 2002; Savage y Davidson, 2003; Trumbore, 2006; Rodeghiero y Cescatti, 2008). Wang y Fang (2009) revisaron investigaciones realizadas en distintos ecosistemas (bosques, matorrales, campos agrícolas) y encontraron que la fracción autotrófica de la Rs puede variar entre 8-64 %, según tipo de vegetación, método de medición y época del año, sin embargo para generalizar, consideran que la respiración de las raíces corresponde al 36 % de la Rs.

Los ecosistemas áridos ocupan la mayor superficie de suelo en el mundo, presentan bajo contenido de materia orgánica en el suelo (Lal, 2004) y tienen una baja capacidad de contener C y de fijar CO₂ por unidad de superficie (FAO, 2002), siendo la Rs uno de sus principales procesos de pérdida de C (Conant *et al.*, 2000). A pesar de esto, se están desarrollando proyectos con la finalidad de capturar C en los suelos áridos (FAO, 2007), los cuales pueden provocar alteraciones en la Rs.

En Chile, las zonas áridas y semiáridas corresponden al 41 % de la superficie total del país (Benites *et al.*, 1994). La región de Coquimbo, que es árida, tiene un porcentaje de cobertura de suelo de praderas y matorrales cercana al 78 % de su superficie regional,

según el último Censo Agropecuario realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2007). Por otra parte, Gajardo (1994) sostiene que, en dicha región, la cobertura vegetal no es predominante, existiendo vastas extensiones de suelo descubierto en condiciones naturales pero también influenciadas por la actividad antropogénica (e.g. consumo de leña, sobrepastoreo, remoción de la cobertura vegetal para ampliar la frontera agrícola) que han provocado severos daños de erosión.

La forestación es una práctica que permite la recuperación de suelos degradados y un potencial secuestro de C . A su vez genera otros beneficios como mejorar la fertilidad del suelo por depositación de mantillo y/o fijación simbiótica de nutrientes, proteger al suelo de agentes erosivos como viento y agua, atrapar neblinas, ser alternativa en la dieta alimenticia del ganado, ofrecer opciones alternativas para la generación de energía (Lailhacar, 1994, Lailhacar y Torres, 2000). Según el Instituto Forestal (INFOR, 2007) la región de Coquimbo tiene alrededor de 82.745 ha forestadas con plantaciones de especies exóticas, de las cuales el 19 % corresponde a *Acacia saligna* (Labill.) H. L. Wendl. (15.659 ha). *A. saligna* es una leguminosa perenne de rápido crecimiento que presenta buena adaptación a laderas deforestadas, tierras desiertas, suelos salinos, suelos poco profundos; siendo muy interesante su aplicación en suelos degradados para la fijación de dunas. También es una alternativa forrajera de buena calidad para el ganado y como combustible (leña) (Alcaíno *et al.*, 1995; Mora *et al.*, 2002; Perret y Mora, 2003).

En un matorral de *Flourensia thurifera* y *Gutierrezia resinosa* en la región de Coquimbo, Delpiano (2009) detectó mayores contenidos de C en el suelo en el sitio de matorral natural que en el sitio forestado con *A. saligna* (32,25 y 19,29 ton $C\ ha^{-1}$). También determinó, a nivel de ecosistema terrestre, que el matorral natural contiene más C que el matorral forestado (diferencia cercana al 44 %) y atribuyó estas diferencias a la variación en la superficie de cobertura vegetal y en el contenido de C en el suelo debido a la preparación del suelo para la forestación.

Resulta interesante determinar si la forestación de *A. saligna* en un matorral de la zona árida en Chile genera cambios significativos en la R_s con respecto al mismo matorral en condición natural. Para esto es indispensable cuantificar la R_s y comprender los factores que inciden sobre este flujo de CO_2 .

La R_s depende de factores bióticos, tales como actividad microbiana, cobertura vegetal, estado fenológico de la vegetación, biomasa de las raíces finas, y factores abióticos como el contenido de minerales del suelo, disponibilidad de nutrientes (Trumbore, 2006; Johnston *et al.*, citados por Ryu *et al.*, 2009) y, principalmente, de la temperatura del suelo (T_s) y humedad del suelo (H_s) (Jassal *et al.*, 2007; Yim *et al.*, 2003; Trumbore, 2006; Stoyan *et al.*, 2000). Esto incide en que la R_s tenga variaciones temporales (e.g. horaria, diarias, estacionales, anuales) y espaciales (Stoyan *et al.*, 2000).

De los métodos existentes para la medición de la R_s , se utilizó en esta investigación el método de cámara cerrada dinámica de tipo manual. Este método permite obtener una mejor cobertura espacial (según la distribución de los cilindros de muestreo) pero presenta restricciones en la cobertura temporal debido a las limitaciones del operador (Savage y Davidson, 2003).

La mayoría de los modelos empíricos desarrollados para determinar la R_s se basan en la T_s y H_s (Savage y Davidson, 2001 citados por Savage y Davidson, 2003; Trumbore, 2006) sin embargo esta relación no tiene buen ajuste a través del tiempo y espacio dada la influencia de los factores abióticos y bióticos anteriormente señalados en la R_s (Trumbore, 2006). Para comparar la R_s en sitios con distinto clima y vegetación es necesario tener mediciones intensivas de la R_s , T_s , H_s , información de la masa de raíces y patrones de distribución espacial de la vegetación (Carbone y Vargas, 2008).

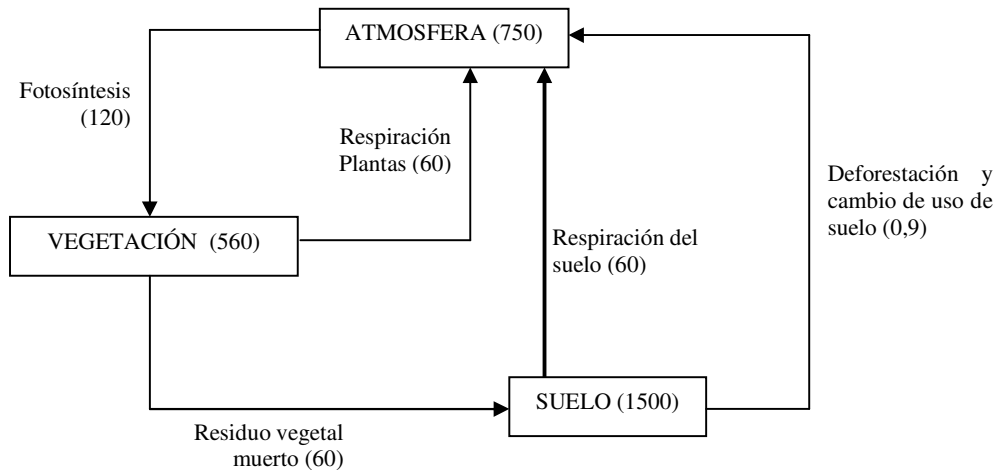


Figura 1. Flujos de C en los ecosistemas terrestres (Los reservorios se encuentran en rectángulos ($\text{Pg } C$) y los flujos son las flechas ($\text{Pg } C \text{ año}^{-1}$). Fuente: elaboración propia basada en GLOBE, 2007.

Los objetivos planteados para esta memoria de título corresponden a:

Objetivo General

Comparar la respiración del suelo en un matorral costero semiárido en condición natural y forestado con *Acacia saligna*, en la región bioclimática Mediterránea Desértico-Oceánica.

Objetivos Específicos

- Identificar los factores ambientales que mejor expliquen la variabilidad diaria de la respiración del suelo.
- Cuantificar el flujo de CO₂ en el suelo durante el período seco.

MATERIALES Y MÉTODO

Características de la zona de estudio

El área de estudio corresponde a un sitio de 60 hectáreas (ha) de matorral costero en condición natural (SN) y un sitio de 60 ha de matorral costero forestado con *Acacia saligna* (SF) (Figura 2), las cuales se encuentran en el Campo Experimental Agronómico Las Cardas (CEALC) (30° 13' S y 71° 19' O), perteneciente a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicado en la comuna de Coquimbo, Región de Coquimbo.

Bioclimáticamente, la zona de estudio corresponde al bioclima Mediterráneo Desértico - Océanico (Luebert y Pliscoff, 2006). La precipitación media anual ⁽¹⁾ es de 152,7 mm con una desviación estándar de 116,6 mm, lo que indica que los montos pluviométricos anuales pueden ser muy irregulares entre un año y otro (e. g. la precipitación anual del año 2007 fue 32,3 mm) ⁽¹⁾, las precipitaciones se concentran principalmente durante los meses de invierno (junio-agosto). El período seco es de 8 a 10 meses en el año (Lailhacar, 1986; Azócar, 2006). La temperatura media anual es de 14,4 °C (Covarrubias, 1986 citado por Azócar *et al.*, 1989) el periodo cálido corresponde a los meses de octubre a marzo, concentrando las más altas temperaturas en el mes de enero (temperatura máxima promedio 30 °C), las temperaturas más bajas se registran en julio siendo la temperatura mínima promedio 7,5 °C según el Centro Información de Recursos Naturales (CIREN, 1990).

De acuerdo a la clasificación bioclimática de Luebert y Pliscoff (2006), la vegetación corresponde a un matorral desértico interior de *Flourensia thurifera* y *Heliotropium stenophyllum* distribuida en las zonas áridas interiores cercanas a la costa entre 0-1.200 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), siendo su símil el matorral estepario costero según la clasificación de Gajardo (1994). El matorral está conformado por arbustos de tipo esclerófilo o deciduo de verano, los que se encuentran asociados con especies herbáceas anuales. El ciclo productivo de estas especies herbáceas depende fuertemente de las condiciones climáticas ya que las semillas comienzan a germinar en función de las primeras

⁽¹⁾ Información Centro de Estudios de Zonas Áridas, CEZA, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

lluvias de otoño, a finales del invierno ocurre el mayor crecimiento, que culmina con la floración y producción de semillas para rápidamente entrar en la fase de senescencia. En los meses más secos o en los años de sequía dominan los arbustos y suculentas (Lailhacar, 1986; Azócar, 2006). Delpiano (2009) detectó que las especies dominantes en el SN corresponden a *Flourensia thurifera* (Mol.) DC, *Gutierrezia resinosa* Hook. et Arn Blacke., *Heliotropium stenophyllum* Hook. et Arn.; mientras que en el SF los arbustos dominantes corresponden a *F. thurifera* y *G. resinosa*. Ambos sitios tienen una gran superficie de suelo desnudo (SN: 69 %, SF: 88 %), sin embargo, el SF presenta el mayor porcentaje debido a la preparación del suelo para efectuar la plantación de *A. saligna* (Delpiano, 2009).

La plantación de *A. saligna* fue realizada en dos etapas durante los años 2005 y 2006, con una densidad de 1200 plantas ha⁻¹. La preparación de suelo significó establecer camellones y por consiguiente la remoción de la cobertura vegetal en las zonas donde se iban a implementar estas estructuras. Durante la época en que se realizó las mediciones de Rs (enero a mayo del 2008) se observó que fueron muy pocas las plantas de *A. saligna* que sobrevivieron, presentando evidentes señales de ramoneo por parte del ganado caprino.

El suelo corresponde a un Aridisol, su material parental es granítico de origen coluvial-aluvial, su textura entre 0-60 cm de profundidad es franco-arcillo-arenosa. Se encuentra en un piedmont de pendiente entre 3-15 %, escasa pedregosidad (4 %) pero abundantes afloramientos rocosos y bajo contenido de humus (Rojo, 1989; Pérez 1996; Luzio *et al.*, 2006).

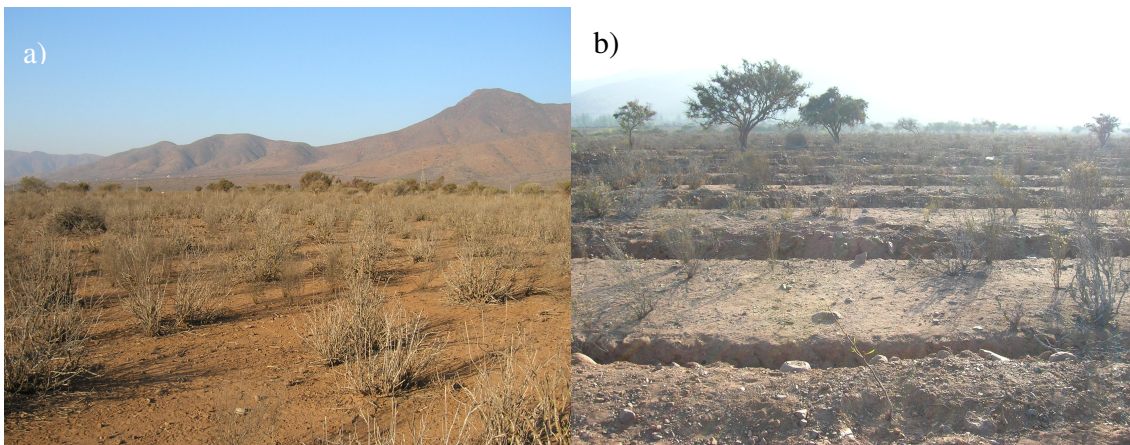


Figura 2. Campo Experimental Agronómico Las Cardas, enero 2008. a) Sitio de matorral natural (SN), b) Sitio de matorral forestado con *A. saligna* (SF).

El diseño experimental de este estudio consistió en medir la R_s en las coberturas de suelo más representativas de los sitios natural y forestado, según Delpiano (2009) estas coberturas corresponden a suelo desnudo (SD), *Flourensia thurifera* (FT) y *Gutierrezia resinosa* (GR) en SN, y suelo desnudo sobre el camellón (SDc), suelo desnudo fuera de camellón (SDfc) y bajo el dosel de GR en el SF. En ambos sitios, se instalaron en el suelo 5 cilindros de PVC que se mantuvieron fijos durante toda la etapa de monitoreo. Los cilindros son fundamentales para la medición de la R_s , ya que sobre ellos estos se instala la cámara de medición.

Equipo de medición

La concentración de CO_2 en el aire del suelo depende de la respiración de las raíces, de la descomposición de la materia orgánica del suelo y de la velocidad de difusión hacia la atmósfera (movimiento marcado por gradientes de concentración y coeficientes de difusión); el aire del suelo presenta cientos de veces más concentración de CO_2 que el aire atmosférico, lo cual explica la salida de C gaseoso desde el suelo hacia la atmósfera (Sadzawka, 2006; Martínez *et al.*, 2008) correspondiendo al flujo de CO_2 medido en esta investigación.

Las mediciones del flujo de dióxido de carbono (CO_2) del suelo a la atmósfera fueron realizadas con el equipo “LI-8100 Automated Soil CO_2 Flux System” (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA) el cual está conformado por la Unidad de Análisis y Control (ACU) que contiene en su interior el analizador infrarrojo de gases (IRGA), la cámara de medición de flujos de CO_2 modelo 8100-103 de 20 cm de diámetro, sensor de temperatura de suelo termocupla tipo E y el sensor de humedad de suelo ECH_2O modelo EC-5 (Figura 3). Este método de medición de R_s corresponde a una cámara cerrada dinámica, la R_s es estimada en función del cambio de la concentración de CO_2 en el interior de la cámara durante el tiempo de medición. El equipo fue transportado manualmente sobre cada cilindro.

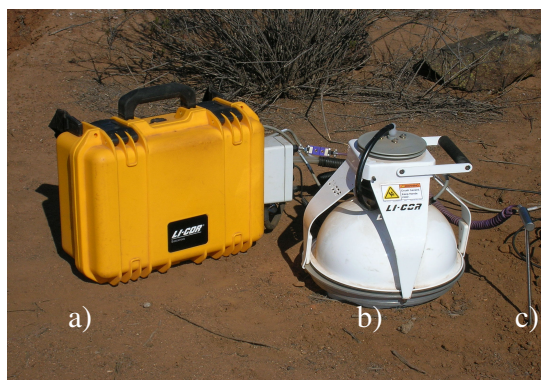


Figura 3. Equipo de medición de respiración de suelo LI-8100. a) ACU, Unidad de Análisis y Control, b) Cámara de medición, c) Sensor de temperatura.

Procedimientos previos a la campaña de medición de respiración de suelo

- a) **Instalación de los cilindros en el suelo:** Para llevar a cabo las mediciones se instalaron en cada sitio 5 cilindros de PVC (dimensiones del cilindro: altura 12 cm, diámetro 21,34 cm) en el suelo a 7 cm de profundidad. Éstos fueron instalados aproximadamente 28 horas antes de la primera fecha de medición con la finalidad de estabilizar la liberación de CO₂ desde el suelo. La ubicación espacial de cada cilindro fue dirigida con la intención de asegurar la representatividad de cada cobertura de suelo determinada por Delpiano (2009) de modo que en el SN se instalaron tres cilindros en suelo desnudo (SD), uno bajo el dosel de *Flourensia thurifera* (FT) y uno bajo el dosel de *Gutierrezia resinosa* (GR), mientras que en el SF se ubicaron dos cilindros en suelo desnudo sobre camellón (SDc), dos cilindros en suelo desnudo fuera camellón (SDfc) y uno bajo GR (Figura 4).

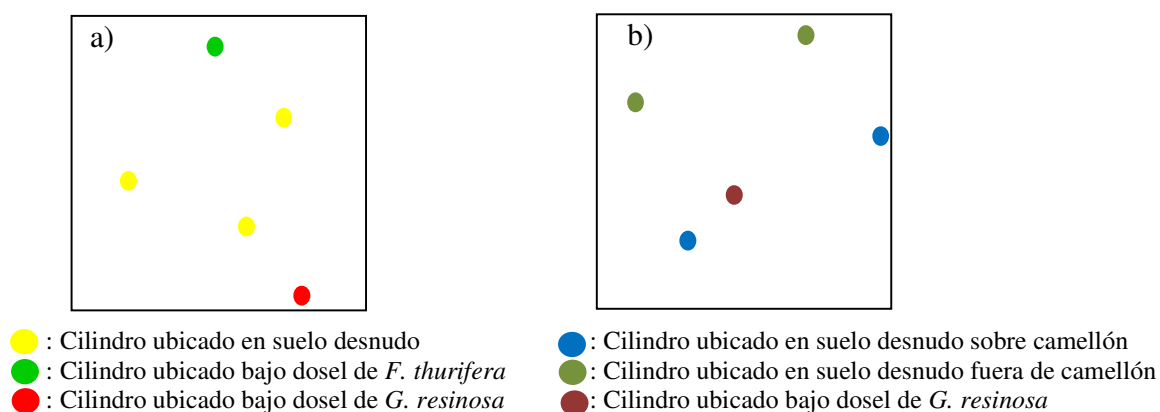


Figura 4. Esquema de distribución espacial de los cilindros (superficie 400 m²). a) Sitio de matorral natural (SN), b) Sitio forestado con *A. saligna* (SF).

b) **Determinación del tiempo de medición ideal para la zona de estudio:**

Transcurridas 24 horas desde que se instalaron los cilindros en SN se realizaron mediciones de prueba bajo un cilindro de las coberturas SD, FT y GR con distintos tiempos de medición (2, 5, 7 y 10 minutos) para ajustar el tiempo de medición ideal. En los cilindros de las tres coberturas se observó una relación inversamente proporcional entre duración de la medición y coeficiente de variación de la R_s (entregado por el equipo LI-8100). Sin embargo, entre la medición de 7 minutos y la de 10 la diferencia de coeficientes de variación de la respiración de suelo fue menos del 5 % por lo tanto se decidió que las mediciones fueran realizadas durante 7 minutos.

Especificaciones técnicas y funcionamiento del equipo LI-8100

El equipo LI-8100 opera correctamente bajo los siguientes rangos de temperatura y humedad relativa: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0 a 95 %, respectivamente. El principio de medición del IRGA corresponde a un infrarrojo no dispersivo que detecta la concentración de CO_2 en un rango de 0 a $3000\text{ }\mu\text{mol mol}^{-1}$ y la concentración de vapor de agua en el rango de 0 a 80 mmol mol^{-1} , ambas con precisión de 1,5 % de la lectura. Los sensores utilizados para la medición de la temperatura de suelo y humedad de suelo van conectados al equipo mediante una interface para sensores auxiliares. El sensor de temperatura de suelo Omega es una termocupla tipo E. El sensor de humedad de suelo ECH_2O modelo EC-5 (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EEUU).

Una vez instalada la base de la cámara sobre el cilindro, se dieron las instrucciones mediante un computador portátil para iniciar la medición, identificando el cilindro en cuestión. La cámara comenzó a bajar automáticamente sobre la base del cilindro, sellando y aislando para evitar las fugas de CO_2 , sin embargo, el diseño de la cámara mantuvo las condiciones ambientales similares al exterior tales como: temperatura de suelo, humedad de suelo, la presión atmosférica en equilibrio entre el interior y exterior de la cámara frente a cualquier condición climática, minimizando las perturbaciones microclimáticas en el interior (LI-COR, 2007). Mediante una bomba de ventilación se hizo circular el aire del interior de la cámara, extrayendo un flujo de aire hacia la Unidad de Control y Análisis (ACU), el cual es filtrado previamente a su ingreso al IRGA donde se analizó la concentración de CO_2 y agua de la muestra del aire y el cambio de ésta en el tiempo de medición. El equipo realiza una corrección de la dilución de CO_2 en el vapor de agua (Figura 5).

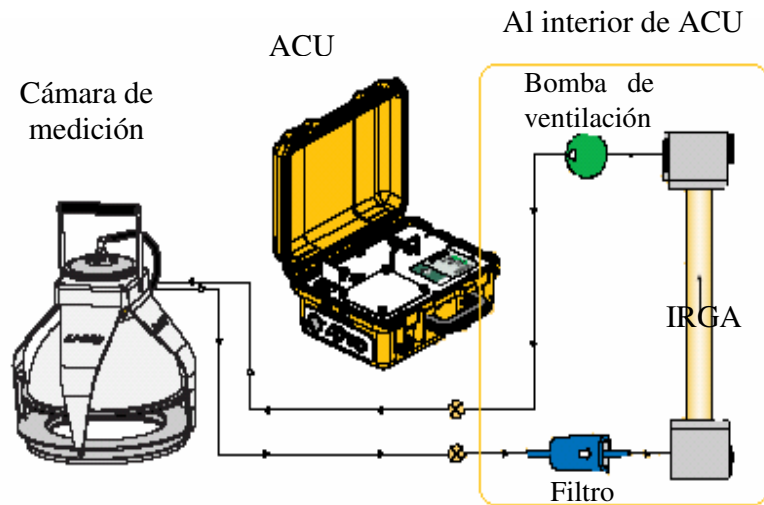


Figura 5. Circulación del aire a través de LI-8100 (adaptación de LI-COR, 2007)

Los valores iniciales de P_0 , W_0 y T_0 de la Ecuación 1 se obtuvieron del intercepto de la regresión lineal que se genera con los 10 primeros valores medidos para estas variables, una vez cerrada la cámara (LI-COR, 2007) ⁽²⁾.

$$R_s = \frac{10 \cdot V \cdot P_0 \cdot \left(1 - \frac{W_0}{1000}\right)}{R \cdot S \cdot (T_0 + 273,15)} \cdot \frac{\partial C'}{\partial t}$$

Ecuación 1

Donde:

Rs: Respiración de suelo [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

Po: Presión inicial [kPa]

V: Volumen total (cámara y porción de cilindro sobre la superficie) [cm^3]

Wo: Fracción molar de vapor de agua inicial [mmol mol^{-1}]

R: Constante de gas (8,314 [$\text{Pa m}^3 \text{ }^\circ\text{K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$])

S: Superficie del cilindro [cm^2]

To: Temperatura inicial del aire [$^\circ\text{C}$]

dC'/dt: tasa de cambio de la concentración de CO_2 corregida por dilución en el tiempo [$\mu\text{mol}^{-1} \text{ mol s}^{-1}$].

⁽²⁾ Mayor detalle sobre el funcionamiento del equipo consultar el Manual de instrucciones del LI-8100/8150, disponible en <http://www.licor.com/env/Products/li8100/8100.jsp>

Las mediciones de temperatura y humedad de suelo fueron realizadas paralelamente a la medición de la Rs. Estos sensores fueron colocados alrededor de los cilindros a una distancia aproximada de 20 cm y enterrados a una profundidad de 5 cm.

Programa de medición de la respiración del suelo y otras variables ambientales

Cada fecha de medición tuvo una duración de tres días con la siguiente programación:

Día 1: Medición en un sitio de la Rs y sus variables ambientales: temperatura ambiente (Ta), temperatura de suelo (Ts), humedad relativa (HR) y humedad del suelo (Hs), en cada uno de sus cilindros, en los siguientes horarios: 23:00, 3:00, 7:00, 10:00, 13:00, 16:00, 19:00 y 21:00 horas.

Día 2: Exactamente igual al Día 1, pero en el otro sitio.

Día 3: Medición en ambos sitios de la Rs y sus variables ambientales: Ta, Ts, HR, Hs; se seleccionaron tres cilindros de cada sitio (SN: cilindro en SD, cilindro bajo FT, cilindro bajo GR; en SF: cilindros en SDc y cilindro bajo GR). El protocolo consistió en medir en los tres cilindros de un sitio e inmediatamente después medir en los tres cilindros del otro sitio. El horario de medición fue: 21:00, 3:00, 9:00, 15:00 horas.

Se realizaron cuatro fechas de medición, entre el 28 de enero y el 8 de mayo del 2008, comenzando los días julianos (DJ): 28, 56, 91 y 126.

Tratamiento de los datos

Detección de valores anómalos o fuera de rango

La primera instancia de detección de valores anómalos consistió en un chequeo de las 409 mediciones obtenidas en las cuatro campañas de medición, eliminándose sólo el dato que presentó errores lógicos como: Ts negativas, Hs excesivamente alta o errores en la determinación de la Rs (el mismo equipo señala si existe error en la estimación de la Rs). Este procedimiento permitió detectar 19 datos anómalos, de los cuales 11 fueron por fallas en el sensor de Ts, 4 por fallas en el sensor de Hs y 4 por error en la Rs.

La segunda instancia de detección de valores anómalos fue utilizando el método de la distancia de Mahalanobis con el programa estadístico JMP 5.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, EEUU). Las variables ambientales (Ts, Hs, HR y Ta) y la Rs en forma conjunta, pueden generar valores que se escapan a la tendencia normal (Vivanco, 1999). Para detectar

si esta situación estaba sucediendo, se agrupó los datos de las mediciones de acuerdo a campaña, sitio y cobertura de suelo. Este método permitió la detección de valores fuera de rango “calculando la distancia de cada caso respecto a un centroide de todos los casos”. Si un valor supera el límite crítico definido convencionalmente es considerado fuera de rango (Vivanco, 1999) por lo tanto el set de dato de Ta, Hs, Ts, HR y Rs de esa medición fue eliminado. Con este método se identificó un set de dato fuera de rango.

Una vez eliminados todos los datos fuera de rango se procedió a trabajar en el cumplimiento de los objetivos planteados en la memoria.

Factores ambientales relacionados a la variabilidad diaria de la respiración del suelo

Se utilizó el programa estadístico JMP 5.1. El método empleado fue una regresión paso a paso (Stepwise) donde la probabilidad de entrada de cada variable al modelo fue de 0,250 y la probabilidad de salida fue 0,100. La variable dependiente fue la Rs y las variables independientes: Ta, HR, Ts y Hs. En este procedimiento se consideraron todos los set de datos de cada cilindro (mediciones realizadas durante las ocho rondas y las cuatro rondas de mediciones continuadas), ordenados por sitio y fecha, agrupados según la cobertura del suelo que representaban (SD, GR, FT en MN, y SDc, SDfc, GR en SN).

Este método comenzó con un modelo de regresión simple, en el primer paso ingresó la variable independiente que cumplió los requisitos de entrada y que mejor correlacionó con la variable dependiente; en el siguiente paso, ingresó otra variable independiente al modelo (cumpliendo los requisitos de entrada) con la condición de mejorar el R^2 o que disminuya la suma de cuadrado del error del modelo; y así sucesivamente. Cada vez que ingresó una variable al modelo, las variables ya seleccionadas volvieron a ser analizadas, pudiendo ser expulsadas del modelo aquellas que satisfagan los criterios de salida o si tuvieron el coeficiente de regresión más bajo. El proceso terminó cuando ninguna de las variables que no han entrado al modelo tuvieron importancia para entrar y cuando las variables seleccionadas no cumplieron los criterios de salida (Pardo y Ruiz, 2002; Morales, 2005). Se estimó la relevancia estadística de los modelos obtenidos con un nivel de confianza del 95 % y significancia 5 % ($\alpha= 0,05$). Se verificó que los modelos cumplieran las hipótesis de regresión lineal con los mismos niveles de confianza y significancia mencionados, para esto se realizó un análisis de los residuales comprobando normalidad (N, test de Shapiro-Wilks, $p > 0,05$), independencia (I, test de Durban-Watson, DW cercano a 2 y $p > 0,05$) y homocedasticidad (H, graficando los residuales y valores estimados de la variable dependiente, existió homocedasticidad cuando la nube de puntos se expandió horizontal y equitativamente alrededor de 0), según las recomendaciones de Morales (2005).

Cuantificación del flujo de CO₂ en el suelo

Para estimar la respiración de suelo diaria (RsD) se necesitaba el valor de la Rs de cada cilindro en función de todas las mediciones realizadas durante el transcurso del día. Para esto, se utilizaron los datos de las ocho rondas de medición entre las 23:00 y 21:00 horas, por lo que en estricto rigor faltaron horas de medición de Rs que permitieran la cuantificación de la RsD. Para resolver esta situación se generó una ronda nueve correspondiente a la hora 24 de medición y en la cual se replicó el valor de la Rs medida en la ronda 1.

Se cuantificó la RsD de cada cilindro integrando las mediciones de Rs con la regla del trapecio que corresponde a una fórmula cerrada de Newton-Cotes (Chapra y Canale, 1988) (Ecuación 2), consistente en determinar el área bajo la curva entre Rs (eje Y) y el tiempo (eje X) mediante la sumatoria de los rectángulos que se generaron para cada intervalo de tiempo en segundos (s)

$$RsD = \sum_{i=1}^{i=9} (t_{i+1} - t_i) \cdot \frac{Rs_i + Rs_{i+1}}{2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

RsD: Respiración de suelo diaria [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

Rs_i: Respiración de suelo medida en la ronda i [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

Rs_{i+1}: Respiración de suelo medida en la ronda siguiente a i [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

T_i: Tiempo en que se midió la Rs en la ronda i [s]

T_{i+1}: Tiempo de medición de suelo medida en la ronda siguiente a i [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

i: ronda 1 a 9.

La hora en que fue realizada la primera medición se consideró como el tiempo de inicio (0 s), luego se calculó los segundos transcurridos entre la hora de medición de la primera y segunda ronda, y así sucesivamente teniendo siempre de referente la hora del tiempo de inicio hasta la ronda 9 correspondiente al tiempo 86400 s (un día).

Algunos cilindros no presentaron la totalidad de registros de medición debido a fallas técnicas que impidieron la realización de la medición o porque se eliminó el dato de Rs considerado anómalo. Para corregir esta situación y obtener la RsD utilizando la

Ecuación 1, se optó por completar los datos faltantes mediante una interpolación simple entre los valores registrados en la ronda previa y posterior a la ronda faltante.

A partir de la RsD estimada para cada cilindro se estimó la RsD de cada tipo de cobertura de suelo. Ésta se obtuvo promediando las RsD de los cilindros correspondientes a dicha cobertura. En los casos en que la cobertura de suelo estaba representada por sólo un cilindro, se utilizó el valor de la RsD calculada para ese cilindro. La RsD de cada sitio fue calculada como un promedio ponderado entre la RsD de cada cobertura de suelo y su respectivo ponderador, tal como se aprecia en Ecuación 3. El factor de ponderación fue calculado en función de las superficies relativas de cobertura de suelo determinado por Delpiano (2009) (ver Apéndice 1).

$$RsD_{cond} = \sum RsD_{cob_i} \cdot P_i \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

RsDcond: Respiración de suelo diaria de la condición [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

RsDcob i: Respiración de suelo diaria de la cobertura de suelo i [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

P: Factor de ponderación correspondiente a la cobertura de suelo i.

La RsD fue comparada estadísticamente entre condiciones a un 95 % de confianza con una prueba t-student utilizando el número de la fecha como bloque.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Factores ambientales que explican la variabilidad diaria de la respiración del suelo

En esta investigación los factores que mejor explicaron la R_s fueron temperatura ambiente (T_a) y humedad relativa (HR), ya que fueron las variables seleccionadas en más ocasiones en primer lugar por la regresión paso a paso, sin embargo en la mayoría de los modelos generados, estos factores se encuentran combinados con otras variables, en especial con temperatura de suelo (T_s). El Cuadro 1 muestra las variables y modelos estadísticos seleccionados en cada sitio, fecha y cobertura de suelo. En el sitio de matorral natural (SN), T_a fue seleccionada en primer lugar en todas las fechas de medición excepto en las coberturas de suelo desnudo (SD) que generó un modelo lineal simple cuya variable dependiente fue humedad de suelo (Hs), y la cobertura de *F. thurifera* (FT) donde la R_s es también explicada por un modelo lineal simple, cuya variable dependiente fue T_s , ambas durante la fecha 1 (DJ: 28, 29). En las mediciones realizadas en la fecha 2 (DJ: 57, 58) sólo hubo asociación con la variable T_s , mientras que los modelos ajustados para las fechas 3 y 4 (DJ: 91,92 y 126- 128) T_a fue seleccionada junto a HR, T_s y Hs, donde cada cobertura presentó combinaciones distintas entre estas variables para explicar la R_s . En general, los modelos para el SN presentan un buen ajuste de correlación (R^2 ajustado $> 0,70$) especialmente aquellos cuyos cilindros estaban bajo la cobertura vegetal de FT y GR.

En el Cuadro 1, se observó, que en el sitio forestado con *A. saligna* (SF) durante la fecha 1 de medición (DJ: 29- 31), la variable seleccionada en primer lugar en todas las coberturas fue HR, situación que se repitió en las campañas 2 y 3 (DJ: 56, 57 y 92- 94) pero sólo en la cobertura de suelo desnudo en camellón (SDc) ya que en las restantes coberturas la variable seleccionada en primer lugar correspondió a T_a . Esta última variable también resultó ser la mejor correlacionada en la fecha siguiente en las coberturas SDc y suelo desnudo fuera de camellón (SDfc). A diferencia de SN, este sitio presentó más estabilidad en la segunda mejor variable seleccionada en los modelos: T_s .

En general, en ambos sitios, los modelos generados presentaron R^2 ajustado superiores a 0,5. Los mejores ajustes (R^2 ajustado $> 0,70$) se observaron mayoritariamente en las coberturas de suelo representadas por un solo cilindro (FT en SN y GR en ambos sitios). En las coberturas representadas por más de un cilindro, los R^2 ajustados altos ($0,60 < R^2$ ajustado $< 0,78$) se detectaron en la cobertura de SDfc en SF, mientras que su símil en SN, presentó R^2 ajustado $< 0,60$ (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variables y modelos estadísticos relacionados a la respiración de suelo.

DJ	Sitio y cobertura	Variables seleccionadas regresión paso a paso				Modelo de regresión lineal	R ² aj	Análisis de residuales			N _{max}	N
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a			N	I	H		
29-31	SF SDc	HR	Hs			0,430 – 0,001 HR – 1,974 Hs (s)	0,36	si	si	no	24	21
	SF SDfc	HR	Ts	Hs		0,044 – 0,002 HR – 0,007 Ts + 2,097 Hs (s)	0,72	si	si	si	16	10
	SF GR	HR				0,107 – 0,0005 HR (ns)	0,14	si	si	si	12	11
56, 57	SF SDc	HR	Ts			0,170 – 0,001 HR – 0,001 Ts (s)	0,51	si	si	si	24	24
	SF SDfc	Ta	Ts			0,078 + 0,006 Ta – 0,005 Ts (s)	0,67	si	no	no	16	16
	SF GR	Ta				-0,003 + 0,004 Ta (s)	0,75	si	si	si	12	11
92-94	SF SDc	HR	Ts	Hs		0,094 – 0,001 HR – 0,003 Ts + 0,449 Hs (s)	0,53	si	si	si	24	23
	SF SDfc	Ta	Ts			0,062 + 0,008 Ta – 0,006 Ts (s)	0,77	si	si	no	16	16
	SF GR	Ta	Ts	HR		-0,060 + 0,007 Ta + 0,0007 HR – 0,001 Ts (s)	0,93	si	si	no	12	12
128, 129	SF SDc	Ta	Ts	Hs		-0,091 + 0,003 Ta – 0,002 Ts + 0,709 Hs (s)	0,43	no	si	si	24	23
	SF SDfc	Ta	Ts			0,046 + 0,010 Ta – 0,007 Ts (s)	0,47	si	no	si	16	16
	SF GR	Ts				0,004 + 0,003 Ts (s)	0,66	si	si	si	12	12
28, 29	SN SD	Hs				-0,322 + 2,683 Hs (s)	0,15	si	no	no	28	25
	SN FT	Ts				-0,116 + 0,011 Ts (s)	0,96	si	si	no	12	12
	SN GR	Ta	Ts			0,076 + 0,003 Ta – 0,002 Ts (s)	0,65	si	si	si	12	12
57, 58	SN SD	Ta	Ts			0,036 + 0,005 Ta – 0,002 Ts (s)	0,35	si	no	no	28	28
	SN FT	Ta	Ts			0,062 + 0,007 Ta – 0,004 Ts (s)	0,81	si	si	si	12	12
	SN GR	Ta	Ts			0,076 + 0,003 Ta – 0,002 Ts (s)	0,77	si	si	si	12	12
91,92	SN SD	Ta	HR			-0,147 + 0,007 Ta – 0,001 HR (s)	0,59	si	no	si	28	27
	SN FT	Ta	Ts	Hs	HR	-0,065 + 0,008 Ta – 0,005 Ts + 0,533 Hs + 0,0005 HR (s)	0,99	si	si	si	12	12
	SN GR	Ta	Ts			0,048 + 0,003 Ta – 0,001 Ts (s)	0,72	no	si	no	12	11
126-128	SN SD	Ta	Hs			-0,173 + 0,003 Ta + 1,175 Hs (s)	0,53	si	no	si	28	28
	SN FT	Ta	HR	Hs		-0,073 + 0,008 Ta + 0,001 HR – 0,541 Hs (s)	0,91	si	si	no	12	12
	SN GR	Ta				0,0199 + 0,003 Ta (s)	0,95	si	si	no	12	12

DJ: Día Juliano; **Sitio y cobertura:** SN: sitio matorral natural, SF: sitio forestado con *A. saligna*; SD: suelo desnudo, FT: *F. thurifera*, GR: *G. resinosa*, SDc: suelo desnudo en camellón, SDfc: suelo desnudo fuera de camellón; **Variables seleccionadas regresión paso a paso:** Ta: temperatura ambiente, Ts: temperatura de suelo, Hs: humedad de suelo, HR: humedad relativa del aire; **Modelo de Regresión Lineal:** (s): el modelo es significativo, $p < 0,05$; (ns): el modelo no es significativo, $p > 0,05$; **R² aj:** coeficiente de determinación ajustado; **Análisis de Residuales:** N: normalidad, I: independencia, H: heterocedasticidad, la etiqueta “si” indica que cumple el criterio, de lo contrario “no”; **N_{máx}:** Número máximo de datos que debieron contemplarse en la estimación del modelo; **N:** Número de datos empleados en la estimación del modelo.

Mediante una comparación por bloques entre ambos sitios se estableció que ninguno de los factores ambientales estudiados presentó diferencias significativas ($p > 0,05$). Esto indica que, en cada fecha de medición, las condiciones ambientales fueron similares en ambos sitios. Sin embargo, en el Cuadro 1 se observa en una misma fecha, que cada cobertura de suelo tiene una respuesta diferente en relación a la Rs y sus mejores variables explicativas con respecto a las otras coberturas (excepto en el SN en la fecha 2).

Los factores ambientales presentaron fluctuaciones en el transcurso del tiempo, se realizó un promedio por fecha con todas las mediciones realizadas (Apéndice 2). La Figura 6 a) y d) refleja que la temperatura de suelo (Ts) y la temperatura ambiente (Ta) disminuyeron mientras que humedad del suelo (Hs) y humedad relativa del aire (HR) presentaron una tendencia al alza en función del transcurso del año (Figura 6 b y c).

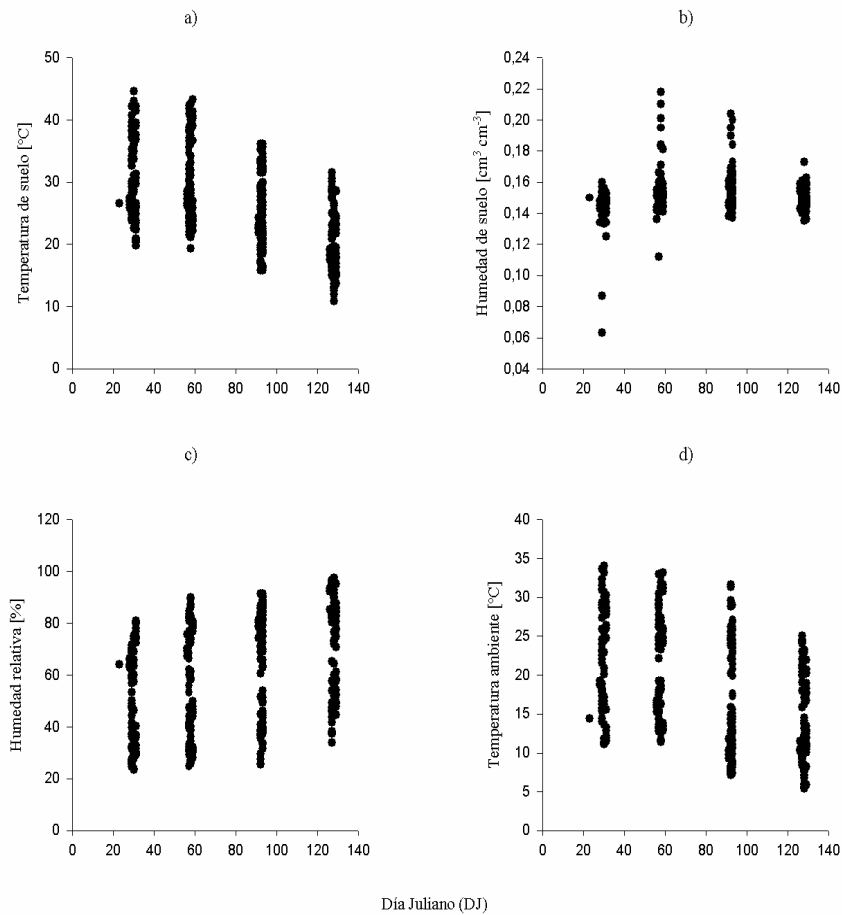


Figura 6. Variación temporal del rango de las variables ambientales.

Tradicionalmente, se ha considerado que los factores más influyentes en la actividad respiratoria del suelo son T_s y H_s (Varnero, 1992; Yim *et al.*, 2003; Trumbore, 2006 y Ryu *et al.*, 2009), especialmente en las capas más superficiales (Nakadai *et al.*, 2002) e incluso muchos estudios han encontrado relaciones significativas entre la R_s y una o ambas variables mencionadas (Nakadai *et al.*, 2002; Knhol *et al.*, 2008). Sin embargo, los resultados de esta investigación no siguen esa tendencia. Álvaro-Fuentes *et al.* (2007) tampoco encontraron relaciones entre la R_s , T_s y H_s , en un agroecosistema semiárido de clima Mediterráneo (valle del río Ebro, España), sin embargo, Almagro *et al.* (2009), en un ecosistema de matorral (clima mesomediterráneo seco), detectaron que en la temporada seca existió correlación negativa entre la R_s y T_s y una correlación positiva entre R_s y H_s ; mientras que Yim *et al.* (2003) detectaron en una plantación de *Larix kaempferi* (alerce japonés), que la T_s y H_s se encuentran más relacionadas a la variabilidad temporal que a la variabilidad espacial de la R_s (clima templado frío). En este contexto, Mascayano (2001)

sugiere que cuando el suelo presenta bajos contenidos de humedad, la R_s es relativamente independiente de la temperatura. En la misma línea, Ryu *et al.* (2009) indican que estudios recientes, que incorporan otros factores como profundidad del mantillo, podrían invalidar a los modelos tradicionalmente usados (T_s y H_s), tanto en ecosistemas naturales como intervenidos. Por otro lado, Nsabimana *et al.* (2009) concluyeron que los factores mejor correlacionados con la R_s son la humedad del suelo, edad de las plantaciones de *Cedrela serrata*, *Entandrophragma excelsum* y *Eucalyptus spp*, área basal y contenidos de C en el suelo. De hecho, la complejidad del sistema no siempre puede ser explicada mediante una relación empírica entre el flujo de CO_2 y sus variables controladoras, otros factores (e.g. cobertura vegetal, biomasa de las raíces finas, mineralogía del suelo, disponibilidad de nutrientes, calidad del mantillo, fenología de las plantas, biota del suelo, cambios estacionales, microclimas) son distintos entre un lugar y otro, e influyen sobre la respiración autotrófica y heterotrófica del suelo (Trumbore, 2006; Knohl *et al.*, 2008; De Forest *et al.*, 2009). Esto explicaría las diferencias entre los factores mejor relacionados con la R_s entre ambos sitios e, inclusive, en el mismo sitio, como se observó entre coberturas en una misma fecha y en una misma cobertura en diferentes fechas. Esta situación fue más frecuente en el SF que en el SN pudiendo atribuirse a que el SF presentó una mayor intervención antrópica asociada a la plantación de *A. saligna*.

La variabilidad diaria de la R_s presentó, en la mayoría de los cilindros, una curva de comportamiento sinusoidal. Se observó en ambos sitios, que los mayores niveles de R_s ocurrieron entre las 10:00 y 15:00 horas, concentrando la mayoría de los registros máximos a las 13:00 horas; mientras que los niveles más bajos de R_s se registraron durante la noche y madrugada (21:00 a 7:00) detectándose a las 21:00 horas la mayor cantidad éstos. Este patrón es bastante similar al observado por Zhang *et al.* (2009) en una pradera de clima continental árido-desértico (China) donde los máximos flujos se produjeron entre las 12:00 y las 14:00 horas y los mínimos a las 8:00 y 20:00 horas. Las Figuras 7 y 8 representan el comportamiento de la R_s durante el transcurso del día, según la cobertura del suelo en el sitio, en las cuatro fechas de medición.

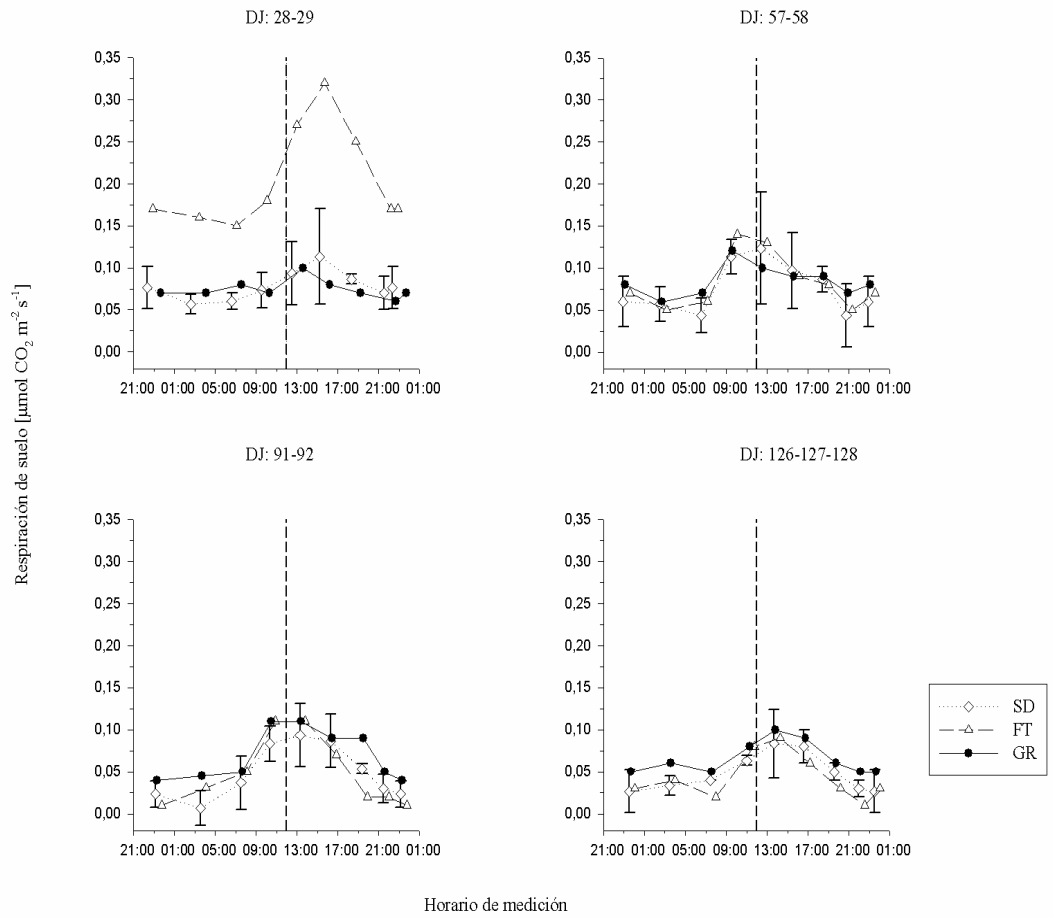


Figura 7. Respiración de suelo en función de la hora, en las tres coberturas representativas del sitio de matorral natural para cada campaña de medición. La línea vertical señala las 12:00 hrs. Las coberturas de suelo corresponden a SD: Suelo desnudo, FT: bajo el dosel de *F. thurifera*, GR: bajo el dosel de *G. resinosa*.

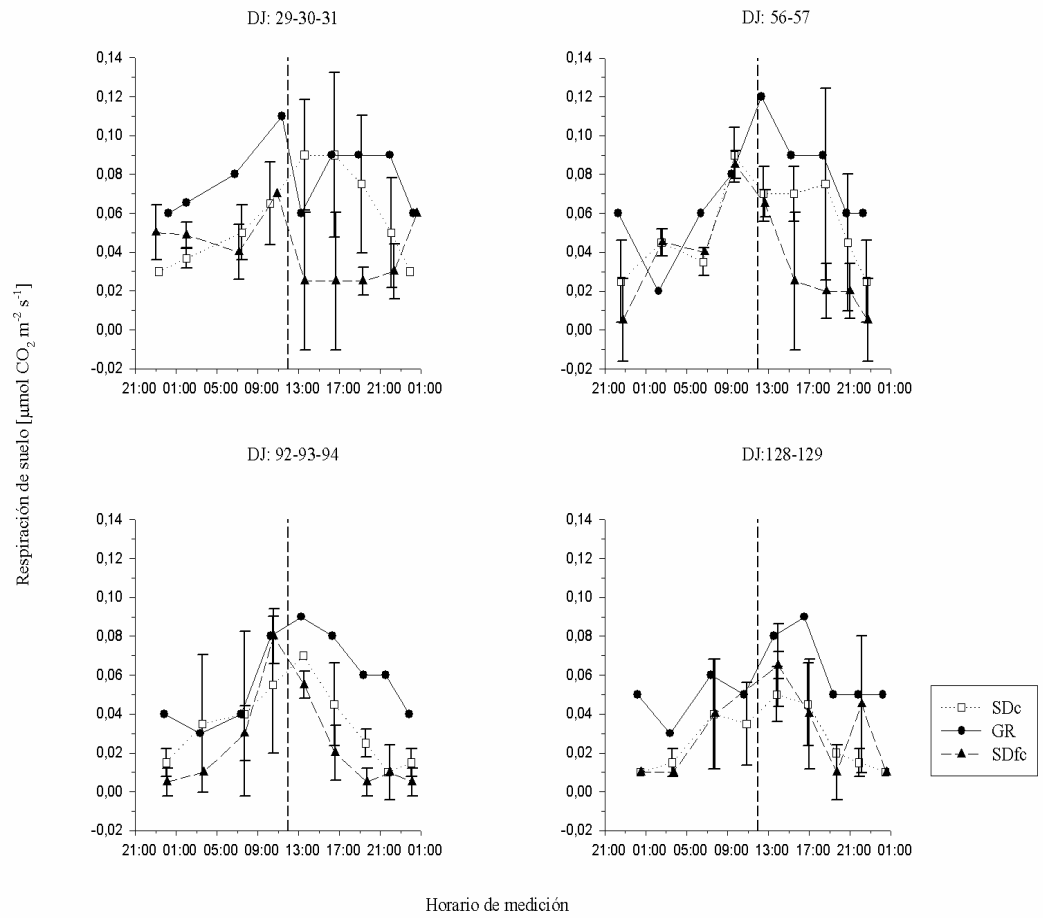


Figura 8. Respiración de suelo en función de la hora, en las tres coberturas representativas del sitio forestado con *A. saligna* para cada fecha de medición. La línea vertical señala las 12:00 hrs. Las coberturas de suelo corresponden a SDe: Suelo desnudo sobre camellón, GR: bajo dosel de *G. resinosa*, SDfc: Suelo desnudo fuera de camellón.

Cuantificación del flujo de CO₂ en el suelo

Se observa en el Cuadro 2 que en ambos sitios la respiración de suelo diaria (RsD) fue disminuyendo en la transición verano-otoño, produciéndose el mayor quiebre entre las mediciones realizadas entre los días julianos (DJ): 56-58 y las de DJ: 91-94, siendo estas diferencias de 2,26 mmol CO₂ m⁻² día⁻¹ en SN y 1,27 mmol CO₂ m⁻² día⁻¹ en SF. La RsD disminuyó aproximadamente un 35 % entre la RsD más alta y más baja en el SF, mientras que en el SN esta diferencia fue cercana al 50 %.

Cuadro 2. Detalle de la respiración de suelo diaria en ambos sitios

Sitio matorral forestado con <i>A. saligna</i> (SF)					Sitio matorral natural (SN)					
Fecha	DJ	RsD por cobertura de suelo			RSD total SF	DJ	RsD por cobertura de suelo			RSD total SN
		SDc (DE)	SDfc (DE)	GR		SD (DE)	FT	GR		
		[mmol CO ₂ m ⁻² día ⁻¹]				[mmol CO ₂ m ⁻² día ⁻¹]				
1	29-31	5,29 (1,22)	3,43 (1,00)	7,07	4,68	28-29	6,70 (1,32)	17,91	6,50	8,81
2	56-57	4,84 (0,94)	3,41 (0,51)	6,04	4,35	57-58	6,69 (1,45)	7,18	7,27	6,85
3	92-94	3,28 (0,71)	2,34 (0,35)	5,08	3,08	91-92	4,32 (1,32)	4,59	6,21	4,59
4	128-129	2,53 (0,82)	2,97 (0,06)	4,93	3,01	126-128	4,38 (0,59)	3,92	5,81	4,46

P = 0,016

RSD: Respiración de suelo diaria, **SDc:** Suelo desnudo en camellón, **SDfc:** Suelo desnudo fuera de camellón, **GR:** *G. resinosa*, **SD:** Suelo desnudo, **FT:** *F. thurifera*, **DE:** desviación estándar.

En todas las fechas de medición, fueron siempre mayores los flujos estimados de Rs en el SN que los estimados en el SF, siendo estas diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,016$), según comparación de los sitios por bloques con un nivel de confianza del 95 % (cada bloque representó una fecha de medición). Estas diferencias en la Rs podrían estar relacionadas con la mayor superficie de suelo con cobertura vegetal, mayor cantidad de raíces y mayor cantidad de C en el suelo, detectado en el SN en relación al SF por Delpiano (2009); estas son características que explican la variación espacial de la Rs en las distintas coberturas de suelo de un mismo sitio y la variación espacial entre sitios (Stoyan *et al.*, 2000; Knhol *et al.*, 2008). En relación al componente autotrófico de la Rs, Knhol *et al.* (2008) detectaron una relación lineal significativa directamente proporcional entre la Rs y la biomasa de las raíces finas, que fue mayor bajo cobertura vegetal que en suelo desnudo (Xu y Qi, 2001 citados por Rodeghiero y Cescatti, 2008). En este contexto Delpiano (2009) determinó que la biomasa de las raíces finas en ambos sitios era más baja que la que caracteriza a los biomas de desierto (SN: 2,3 kg ha⁻¹ C y SF: 2,5 kg ha⁻¹ C).

El Cuadro 3 contiene información sobre distintas investigaciones de R_s realizadas en variados ecosistemas (incluyendo ecosistemas semiáridos); los estudios de Yim *et al.* (2002), Mo *et al.* (2005), Jassal *et al.* (2007) y Knhol *et al.* (2008) realizados en bosques templados, observaron un comportamiento estacional del flujo diario de CO_2 donde los máximos picos de R_s ocurrieron en verano, descendiendo paulatinamente hacia el otoño hasta obtener los mínimos flujos de CO_2 en invierno, durante la primavera el flujo tendió a aumentar hasta la temporada de verano. Por el contrario, Almagro *et al.* (2009) detectaron, en un sector de matorrales en España (clima mediterráneo seco), que la R_s aumentó a ritmo constante a finales de invierno alcanzando su máximo pico en primavera, declinando durante la temporada seca a finales de primavera y comienzo de verano, ocurriendo en agosto (mes más caluroso y con menor contenido de humedad en el suelo) el nivel más bajo de R_s , en otoño se apreció un aumento de la R_s respecto al verano (Cuadro 3). Cabe destacar, que en todos estos estudios, se ha monitoreado durante todo el año el comportamiento de la R_s y en función de esto se ha detectado las temporadas que presentan los más altos y bajos niveles de flujo de CO_2 , mientras que la presente investigación sólo representa la R_s en verano y parte de otoño. Por esto, resulta de interés monitorear la R_s durante el resto del año ya que podría detectarse un aumento la R_s debido a precipitaciones, especialmente después de un período seco prolongado (Savage y Davidson, 2003; Almagro *et al.*, 2009).

Como se aprecia en los Cuadros 2 y 3, la R_s detectada durante este estudio fue extremadamente baja en comparación a las otras investigaciones, inclusive, las mediciones realizadas en la misma zona de estudio y en los mismos sitios por Pérez-Quezada *et al.* (datos sin publicar) durante los DJ: 8-10, 41- 43, 67- 69, 104-107, 135-137 del año 2009, arrojó resultados de R_sD más elevados en ambos sitios, siendo siempre mayores en SN que en SF. Tales diferencias pueden estar relacionadas con las condiciones de extrema sequedad (Raich *et al.*, 2002; Savage y Davidson, 2003; Almagro *et al.*, 2009) que caracterizó al período de esta investigación, antecedido por un año 2007 con precipitaciones por debajo del promedio anual (32,3 mm año⁻¹ y 152,7 mm año⁻¹ respectivamente), mientras que las mediciones realizadas por Pérez-Quezada *et al.* (datos sin publicar) fueron antecedidas por un invierno que presentó un monto pluviométrico por sobre el promedio anual (181,8 mm año⁻¹). Según Raich *et al.* (2002), en los biomas áridos, la precipitación se encuentra directamente correlacionada con las emisiones de CO_2 desde el suelo, y por lo tanto las variaciones estacionales o anuales de la precipitación influyen la dinámica espacial y temporal de los flujos de CO_2 . En este mismo contexto, Savage y Davidson (2003) detectaron que la R_s en un bosque de 60 años en Massachussets fue mayor cuando el suelo tiene más humedad, a su vez, observaron que la R_s tenía una rápida respuesta frente a eventos de precipitación, aumentando considerablemente respecto a los periodos secos. Nsabimana *et al.* (2009) monitorearon los flujos de CO_2 desde el suelo en seis plantaciones forestales en el sur de Ruanda y detectaron en todas el mismo patrón estacional donde la R_s fue mayor en las temporadas de lluvia que en las temporadas secas (climáticamente presenta en el año dos temporadas de abundantes precipitaciones intercaladas por temporadas secas, precipitación promedio anual 1246 mm) (Cuadro 3).

Una escasez de agua presenta consecuencias vinculadas a una menor Rs: escaso desarrollo de biomasa herbácea, mayor consumo de vegetación leñosa (tallos y hojas) por parte del ganado caprino, menos aporte de restos vegetales al mantillo influyendo sobre la calidad y cantidad de materia orgánica en el suelo, menor actividad biológica en el suelo (Varnero, 1992). Esta es la razón por la cual Mascayano (2001) justificó que la actividad biológica global en los suelos de Las Cardas fuese más baja que la observada en estudios de la zona central y sur de Chile. Otra causa asociada a una disminución de la Rs es el pastoreo (Wang y Fang 2009), ambos sitios han sido sometidos a tales prácticas (ganado caprino), sin embargo, los mayores efectos son evidentes en el ramoneo de la especie *A. saligna*, cuyas plantas presentaron un desarrollo mucho menor al esperado para su edad.

Cuadro 3. Resumen de respiración de suelo diaria detectada en distintos ecosistemas por distintos autores.

Ecosistema	Estación	Respiración de suelo [mmol CO ₂ m ⁻² día ⁻¹]	Temperatura media anual del aire [°C]	Precipitación media [mm año ⁻¹]	Fuente
Bosque templado frío	Verano	354,55	11,1	2060	Yim <i>et al.</i> (2002)
	Otoño	207,27			
	Invierno	54,55			
	Primavera	163,64			
Bosque templado frío	Primavera	133,75 – 248,18	7,2	2275	Mo <i>et al.</i> (2005)
	Verano	350,35			
	Otoño	126,76			
Bosque templado tropical con estación seca	Otoño	139,97	8,6	1450	Jassal <i>et al.</i> (2007)
	Verano	320,54 - 513,22			
Bosque templado	Invierno	43,2	8,4	899	Knohl <i>et al.</i> (2008)
	Verano	518,4			
Pradera semiárida	Invierno	□ 31,1	-9 a 2,5 9,7 a 31	298	Myklebust <i>et al.</i> (2008)
	Verano	□ 237,6			
Matorral mediterráneo	Primavera	288,58 - 309,31	15,5	370	Almagro <i>et al.</i> (2009)
	Verano	106,27 - 286,85			
Plantación Forestal (<i>Cedrela serrata</i> , <i>Entandrophragma excelsum</i> , <i>Eucalyptus spp</i>)	Promedio anual	307,58	19	1246,4	Nsabimana <i>et al.</i> (2009)

(Continúa)

Cuadro 3. (Continuación)

Ecosistema	Estación	Respiración de suelo	Temperatura media anual del aire	Precipitación media	Fuente
		[mmol CO ₂ m ⁻² día ⁻¹]	[°C]	[mm año ⁻¹]	
Matorral Mediterráneo desértico- oceánico	Verano	14,13 - 17,06	14,4	152,7	Pérez- Quezada <i>et al.</i> (datos sin publicar)
	Otoño	7,99 - 10,52			
	Invierno	43,34 - 63,03			
	Primavera	40,56			
Matorral Mediterráneo desértico- oceánico, Plantación de <i>Acacia saligna</i>	Verano	9,64 - 15,26	14,4	152,7	Pérez- Quezada <i>et al.</i> (datos sin publicar)
	Otoño	2,52-6,02			
	Invierno	28,28-31,90			
	Primavera	38,28			
Matorral Mediterráneo desértico- oceánico	Verano	6,85 – 8,81	14,4	32,3	Este estudio
	Otoño	4,46 – 4,59			
Mediterráneo desértico- oceánico, Plantación de <i>Acacia saligna</i>	Verano	4,35 – 4,68	14,4	32,3	Este estudio
	Otoño	3,01 – 3,08			

CONCLUSIONES

La respiración de suelo en el sitio natural resultó mayor que en el sitio forestado en las cuatro fechas de medición. Estas diferencias podrían estar relacionadas a las repercusiones causadas por la preparación de suelo (establecimiento de camellones y remoción de cobertura vegetal) y el sobrepastoreo que afectó especialmente a *A. saligna*, en el sitio forestado.

Los bajos flujos de respiración de suelo obtenidos en ambos sitios podrían deberse al estado de sequía que afectaba a la región (escasas precipitaciones del año 2007) y que condiciona el crecimiento de la pradera, el metabolismo de plantas, de la biota del suelo y de la cantidad de materia orgánica en el mantillo.

La respiración de suelo es un proceso complejo, sensible a variaciones de las condiciones ambientales (naturales o influenciadas por el hombre). Para comprender su comportamiento, se ha relacionado tradicionalmente a temperatura del suelo y humedad de suelo, sin embargo, en esta investigación, dichas variables no fueron tan relevantes en los modelos generados para los que la respiración de suelo ajustó mejor a otras variables explicativas (temperatura ambiente y humedad relativa del aire). En consecuencia, se sugiere que nuevas investigaciones incorporen otras variables relacionadas a la respiración de suelo, tales como: biomasa de raíces finas, profundidad de mantillo, precipitaciones.

Resulta interesante que futuras labores de monitoreo de la respiración de suelo en el matorral desértico costero se realicen en distintas temporadas del año que permitan comprender el comportamiento estacional de los flujos de carbono, identificar si el establecimiento y crecimiento futuro de *A. saligna* modifica los actuales niveles de respiración de suelo que representan a dicho sitio y determinar si los modelos obtenidos en esta investigación tienen consistencia en el tiempo y espacio, a modo de generar modelos que permitan estimar la respiración de suelo con un mayor grado de seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

Alcaíno E., S. Benedetti, S. Perret y G. Valdebenito. 1995. *Acacia saligna* una especie multipropósito: su potencial forrajero en la provincia de Choapa, IV región. *Ciencias Forestales* 10 (1-2): 73-84.

Almagro M., J. López, J. I. Querejeta y M. Martínez-Mena. 2009. Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 594-605.

Álvaro-Fuentes, J., C. Cantero-Martínez, M. V. López y J. L. Arrúe. 2007. Soil carbon dioxide fluxes following tillage in semiarid Mediterranean agroecosystems. *Soil & Tillage Research* 96: 331-341.

Azócar, P., S. Lailhacar y H. Rojo. 1989. Estimación de la fitomasa forrajera del incienso (*Flourensia thurifera* (MOL.) DC.), a través de variables alométricas. *Avances de Producción Animal* 14 (1-2): 15-25

Azócar, P. 2006. Praderas de la zona forrajera de secano norte. Circular de extensión: 32: 12-25. Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Benites, J., D. Saintraint y K. Morimoto. 1994. Degradación de tierras y producción agrícola en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay. pp 86-116. *In: Erosión de suelos de América Latina*. FAO. Santiago, Chile.

Carbone, M.S. y R. Vargas. 2008. Automated soil respiration measurements: new information, opportunities and challenges. *New Phytologist* 177: 295-297.

Centro Información de los Recursos Naturales (CIREN). 1990. Atlas agroclimático de Chile Regiones IV a IX. Publicación n°87. Santiago, Chile. 67 p.

Chapra, S. y R. Canale. 1988. Métodos numéricos para ingenieros con aplicaciones en computadores personales. Mc Graw Hill. México. 641 pp.

Conant, R.T., J. M. Klopatek y C. C. Klopatek. 2000. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. *Soil Science of Society America Journal* 64: 383–390.

De Forest, J., J. Chen y S. McNulty. 2009. Leaf litter is an important mediator of soil respiration in an oak-dominated forest. *International Journal of Biometeorology* 53: 127-134.

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

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

GLOBE, 2007. Carbon Cycle. The GLOBE program, <http://www.globe.gov/fsl/html/templ.cgi?carboncycleDia> Leído el 18 de noviembre 2009.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2000. Informe especial del IPCC, uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Resumen para responsables de políticas, <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-sp.pdf> Leído el 29 de abril 2008.

Instituto Forestal (INFOR). 2007. Superficie de plantaciones forestales región de Coquimbo, http://www.infor.cl/estadisticas_mercado/plantaciones_forestales/2007/super_plantaciones_forest_coquimbo.htm Leído el 30 de mayo 2009.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2007. VII Censo nacional agropecuario y forestal, <http://www.censoagropecuario.cl> Leído el 10 de agosto 2009.

Jassal, R., T. Black, T. Cai, K. Morgenstern, Z. Li, D. Gaumont-Guay y Z. Nestic. 2007. Components of ecosystem respiration and an estimate of net primary productivity of an intermediate-aged Douglas-fir- stand. *Agricultural and Forest Meteorology* 144: 44-57.

Knhol, A., A. Soe, W. Kutsch, M. Göckede y N. Buchmann. 2008. Representative estimates of soil and ecosystem respiration in an old beech forest. *Plant Soil* 302: 189-202.

Lailhacar, S. 1986. Las grandes formaciones vegetales de las zonas desértica y mediterráneas perárida y árida de Chile: con énfasis en sus aptitudes forrajeras. Boletín de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo 5: 145-231.

Lailhacar, S. 1994. Importancia del árbol y del arbusto en la productividad de las praderas de secano árido y semiárido de Chile. Circular de Extensión 19: 1-11. Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile.

Lailhacar, S. y C. Torres, 2000. Papel de los arbustos forrajeros en la ganadería del secano árido de la zona centro-norte. Circular de Extensión 26: 1-12. Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma 123: 1-22.

LI-COR, 2007. LI-8100 Automated soil CO₂ flux system. 4th ed. Instruction Manual. LI-COR Biosciences. Lincoln, Nebraska, EEUU. 433 p.

Luebert F. y P. Plischoff. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Universitaria. Santiago, Chile. 316 p.

Luzio, W., M. Casanova y W. Vera. 2006. Clasificación de suelos. pp. 241-286. *In*: Luzio W. y M. Casanova (Eds.). Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Santiago, Chile. 393 p.

Martínez, E., J. P. Fuentes y E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la Ciencias del Suelo y Nutrición Vegetal 8 (1): 68-96.

Mascayano, C. 2001. Establecimiento de un índice de actividad biológica global del suelo en ecosistemas áridos de la IV región. Memoria Ingeniero Agrónomo, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 61 p.

Myklebust M. C., L. E. Hipps y R. J. Ryel. 2008. Comparison of eddy covariance, chamber, and gradient methods of measuring soil CO₂ efflux in an annual semi-arid grass, *Bromus tectorum*. Agricultural and Forest Meteorology 148: 1894-1907.

- Mo, W., M. Lee, M. Uchida, M. Inatomi, N. Saigusa, S. Mariko y H. Koizumi. 2005. Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology* 134: 81-94.
- Mora F., R. Meneses y S. Perret. 2002. Potencialidades y limitaciones de *Acacia saligna* en la región de Coquimbo, Chile; y su relación con los ecosistemas de clima Mediterráneo. *Avances de Producción Animal* 27 (1-2): 9-20. Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.
- Morales, E., 2005. Diseño experimental a través del análisis de varianza y modelo de regresión lineal. Consultora Carolina. Valdivia, Chile. 248 p.
- Nakadai, T., M. Yokozawa, H. Ikeda y H. Koizumi. 2002. Diurnal changes of carbon dioxide from bare soil in agricultural field in Japan. *Applied Soil Ecology* 19: 161-171.
- Nsabimana D., L. Klemedtson, B. A. Kaplin y G. Wallin. 2009. Soil CO₂ flux in six monospecific forest plantations in Southern Rwanda. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 396-402.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos 96. Roma, Italia. 83 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2007. Secuestro de carbono en tierras áridas. Informes sobre recursos mundiales de suelos 102. Roma, Italia. 135 p.
- Pardo, A. y M. A. Ruiz. 2002. SPSSII Guía para el análisis de datos. Mc Graw Hill. España. 715 p.
- Pérez, J. 1996. Elaboración de un modelo para la determinación de la capacidad de sustentación de terrenos de pastoreo de la región árida chilena. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile. 122 p.
- Perret S. y F. Mora. 2003. *Acacia saligna* en zonas áridas, su utilidad como recurso energético. *Tierra Adentro* 51: 50-51.

- Post, W. M. y K.C. Kwon. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* 6: 317-327.
- Pumpanen, J., P. Kolari, H. Ilvesniemi, K. Minkkinen, T. Vesala, S. Niinistö, A. Lohila, T. Larmola, M. Morero, M. Pihlatie, I. Janssens, J. Curiel Yuste, J. M. Grünzweig, S. Reth, J.A. Subke, K. Savage, W. Kutsch, G. Østreg, W. Ziegler, P. Anthoni, A. Lindroth, P. Hari. 2004. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology* 123: 159-176.
- Raich J., C. Potter y D. Bhagawati. 2002. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. *Global Change Biology* 8: 800-812.
- Rojo, H. 1989. Efecto del sistema y de la época de pastoreo sobre la disponibilidad de forraje del incienso (*Flourensia thurifera* (Mol.) DC. Memoria Ingeniero Agrónomo, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile. 108 p.
- Rodeghiero, M. y A. Cescatti. 2008. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration. *Forest Ecology and Management* 255: 106-112.
- Ryu, S., A. Concilio, J. Chen, M. North y S. Ma. 2009. Prescribed burning and mechanical thinning effects on belowground conditions and soil respiration in mixed-conifer forest, California. *Forest Ecology and Management* 257: 1324-1332.
- Sadzawka, A. 2006. Propiedades físico-químicas de los suelos I: Reacción (pH), acidez y alcalinidad. pp: 91-127. *In*: Luzio W. y M. Casanova (Eds.). Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Santiago, Chile. 393 p.
- Savage, K y E. Davidson. 2003. A comparison of manual and automated systems for soil CO₂ flux measurements: trade-offs between spatial and temporal resolution. *Journal of Experimental Botany* 54 (384): 891-899.
- Stoyan, H., H. De-Polli, S. Böhm, G. Robertson y E. Paul. 2000. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. *Plan and Soil* 222: 203-214.
- Trumbore, S. 2006. Carbon respired by terrestrial ecosystems-recent progress and challenges. *Global Change Biology* 12: 141-153.

- Varnero, M. T. 1992. El suelo como sistema biológico. Pp 197-214. *In*: Vera, W. (Ed). Suelos, una visión actualizada del recurso. Publicaciones misceláneas agrícolas n° 38. Departamento de Ingeniería y suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 345 p.
- Vivanco, M. 1999. Análisis estadístico multivariable: teoría y práctica. Universitaria. Santiago, Chile, 234 p.
- Wang, W., y J. Fang. 2009. Soil respiration and human effects on global grasslands. *Global Planetary Change* 67 (1-2): 20-28.
- Yim, M., S. Joo y K. Nakane. 2002. Comparison of field methods for measuring soil respiration: a static alkali absorption method and two dynamic closed chamber methods. *Forest Ecology and Management* 170: 189-197.
- Yim, M., S.J. Joo, K. Shutou y K. Nakane. 2003. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: estimation of the number of sampling points required. *Forest Ecology and Management* 175: 585-588.
- Zhang L., Y. Chen, W. Li y R. Zhao. 2009. Abiotic regulators of soil respiration in desert ecosystems. *Environmental Geology* 57: 1855-1864.

APÉNDICES

Apéndice 1. Ponderaciones empleadas para la estimación de la respiración de suelo diaria de cada condición.

Ponderaciones según cobertura de suelo.

Condición Natural (CN)			Condición Forestada (CF)		
SD	FT	GR	SDc	SDfc	GR
0,69	0,19	0,12	0,44	0,44	0,12

(Fuente: adaptación Delpiano, 2009)

Apéndice 2. Variación temporal de los factores ambientales

Resumen de la variación temporal de los factores ambientales.

	DJ	Ts	Ta	Hs	HR
		[°C]		[cm ³ cm ⁻³]	%
Promedio (DE)		30,81 (6,60)	22,09 (6,64)	0,14 (0,01)	50,23 (18,71)
Máximo	28-31	44,62	34,00	0,16	80,89
Mínimo		19,73	11,05	0,06	23,44
Promedio (DE)		30,09 (6,65)	21,47 (7,06)	0,15 (0,01)	55,13 (20,79)
Máximo	56-58	43,20	33,15	0,22	89,86
Mínimo		19,26	11,37	0,11	24,82
Promedio (DE)		24,59 (5,73)	16,38 (7,16)	0,16 (0,08)	64,27 (21,04)
Máximo	91-94	36,13	31,62	0,93	91,47
Mínimo		15,76	7,10	0,14	25,35
Promedio (DE)		19,61 (4,92)	13,45 (5,30)	0,14 (0,01)	74,31 (18,54)
Máximo	126-129	31,53	25,07	0,17	97,60
Mínimo		10,86	5,40	0,14	33,85