

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**RESPIRACIÓN DE SUELO EN SISTEMAS DE CERO LABRANZA Y
LABRANZA TRADICIONAL EN CONDICIONES DE SECANO DE LA REGIÓN
METROPOLITANA.**

Nicolás Francis Schnetzer Chauvaud

Santiago, Chile

2011

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**RESPIRACIÓN DE SUELO EN SISTEMAS DE CERO LABRANZA Y
LABRANZA TRADICIONAL EN CONDICIONES DE SECAÑO DE LA REGIÓN
METROPOLITANA.**

**RESPIRATION OF SOIL ON NON-TILLAGE AND CONVENCIONAL TILLAGE
SYSTEM UNDER RAINFED CONDITIONS IN THE METROPOLITAN REGION.**

Nicolás Francis Schnetzer Chauvaud

Santiago, Chile

2011

UNIVERSIDAD DE CHILE**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS****ESCUELA DE PREGRADO****RESPIRACIÓN DE SUELO EN SISTEMAS DE CERO LABRANZA Y
LABRANZA TRADICIONAL EN CONDICIONES DE SECANO DE LA REGIÓN
METROPOLITANA.**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero en
Recursos Naturales Renovables

NICOLÁS FRANCIS SCHNETZER CHAUVAUD

Profesores Guías	Calificaciones
Sr. Jorge Pérez Quezada Ingeniero Agrónomo, M.S., Ph.D.	6,5
Sra. Paola Silva Ingeniero Agrónomo, M.S., Dra.	6,0
Profesores Evaluadores	
Sr. Juan Pablo Fuentes Ingeniero Forestal, M.S., Ph.D.	6,2
Sr. Pablo Morales Peillard Ingeniero Agrónomo, M.S., Ph.D.	6,5
Colaborador	
Sr. Eduardo Martínez Ingeniero Forestal, Dr.	

**Santiago, Chile
2011**

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN.....	7
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos.....	10
MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
Características del Sitio de Estudio.....	11
Condiciones y tratamientos de los cultivos	11
Equipo de medición y funcionamiento.....	12
Relación del flujo de CO ₂ con las variables ambientales predictoras.....	14
Tratamiento de los datos.....	16
Cuantificación del flujo de CO ₂ desde el suelo a la atmósfera	17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
Relación del flujo de CO ₂ con las variables ambientales predictoras.....	19
Flujo diario	19
Flujo estacional.....	24
Cuantificación del flujo de CO ₂ desde el suelo a la atmósfera en los sistemas cero labranza y labranza tradicional	28
CONCLUSIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA	32
ANEXOS.....	35
ANEXO 1. Procedimiento de cálculo de la evapotranspiración horaria, adaptación de texto publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO, 2006).....	35
ANEXO 2. Glosario de términos	48
APÉNDICE 1. Gráficos de comportamiento diario de las variables medidas y/o calculadas por condición de labranza.....	49
APÉNDICE 2. Muestras de rastrojo.....	51

RESUMEN

Dentro de los ecosistemas terrestres, el suelo se considera el mayor reservorio y sumidero de carbono (C) y la respiración de suelo (RS) corresponde a uno de los principales flujos de transferencia de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. Es importante estudiar la RS en distintos escenarios para poder discriminar diferencias que existan en este proceso. Se planteó entonces, comparar las emisiones de CO₂ de suelo de dos cultivos agrícolas de habas (*Vicia faba L.*) de la zona central de Chile, desarrollados bajo tratamiento en cero labranza (CL) y en labranza tradicional (LT) y generar modelos con y sin restricciones de signo en las variables dependientes y en dos escalas temporales distintas (diaria y estacional) para describir la RS, utilizando variables ambientales medidas en terreno.

En total se realizaron 5 campañas de mediciones en el período octubre-enero, 2008/09. En cada una se midió tanto los flujos de CO₂, como las variables ambientales de temperatura ambiente (TA), temperatura de suelo (TS), humedad relativa (HR) y contenido de H₂O volumétrico del suelo (CV). Las mediciones se realizaron utilizando un sistema de cámara cerrada dinámica. Además, se incluyó como variable la evapotranspiración de cultivo (ET_c) calculada para cada registro medido, utilizando la ecuación FAO Penman-Monteith.

Como resultados se obtuvieron, en la escala diaria con restricción de signo 3 modelos significativos (campañas 1, 4 y 5 en CL), con un R² que varió entre 0,79 y 0,89 siendo TA y ET_c las variables utilizadas, mientras que en la escala diaria sin restricción de signo se generaron 6 modelos (Campañas 1, 3, 4 y 5 en CL y 1 y 4 en LT), con un R² entre 0,79 y 0,99 siendo TA, TS y ET_c las variables más recurrentes. En la escala estacional los dos modelos generados fueron significativos, obteniéndose un R² ajustado en CL de 0,86 y de 0,95 en LT siendo ET_c la variable utilizada para describir la RS. En cuanto a las emisiones, se contabilizó que en el período medido se emitieron a la atmósfera 389 g CO₂ m⁻² en el tratamiento bajo CL, mientras que en LT se emitieron 319 g CO₂ m⁻². El mayor flujo de CO₂ registrado en CL se relacionaría con una mayor existencia y actividad de microorganismos en ese tratamiento, debido principalmente a la mayor cantidad de materia orgánica disponible.

Los resultados corresponden a las emisiones de un suelo con un cultivo de haba en secano entre Octubre-Enero 2008/2009, por lo que faltó realizar mediciones en los meses restantes no medidos en este trabajo.

Palabras clave: Respiración de suelo, Evapotranspiración, Sistemas de Labranza, Cero labranza, Labranza tradicional, FAO Penman-Monteith.

ABSTRACT

In terrestrial ecosystems, soil is considered the major reservoir and sink of Carbon (C) and soil respiration corresponds to one of the main flows of transfer of carbon dioxide into the atmosphere. Given this, it is necessary to study how it behaves and how is the exchange of carbon dioxide (CO₂) in this system, and also analyze different scenarios and land uses that generate different behaviors. It was propose then, to compare the emissions of CO₂ in the soil of two crops of faba beans (*Vicia faba L.*) in central Chile, developed under a different soil treatment (non-tillage and conventional tillage) and to generate models using environmental variables to describe the behavior of each treatment in two different time scales (daily and seasonal).

In total, 5 field measurement campaigns were conducted in the period from October to January, 2008/09 in order to measure the emissions generated, and also obtain details of the environmental variables of ambient temperature (TA), soil temperature (TS), relative humidity (HR) and volumetric water content of the soil (CV). The measurements were made using a close chamber system. In addition, it was also included as a variable the evapotranspiration calculated for each record measured, using the FAO Penman-Monteith equation.

As results were obtained in the daily scale with sign restriction 3 significant models (campaigns 1, 4 and 5 in CL), ranging the R² between 0,79 and 0,89 being ET_c and TA the selected variables, while in the daily scale without sign restriction 6 significant models were generated (Campaigns 1, 3, 4 and 5 in CL and 1 and 4 in LT) being TA, TS and ET_c the most recurrent variables to describe the RS. In the seasonal scale, the adjusted R² of the models ranged between 0,79 and 0,98 being the best correlation between ET_c and RS in both models. Regarding emissions, in non-till system were released to the atmosphere 390 g CO₂ m⁻², and in conventional tillage system 319 g CO₂ m⁻². The greater flow of CO₂ recorded in this period in non-tillage was due to a greater presence and respiration of microorganisms in this treatment product of the largest pool of organic matter available.

However, to get conclusive results on this study, measurements in the non measured months are needed, which correspond to the remaining stages of the crop growth.

Keywords: soil respiration, evapotranspiration, tillage systems, zero tillage, conventional tillage, FAO Penman-Monteith.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres representan el tercer sumidero de C en importancia en la Tierra después de los océanos y el sumidero geológico. Se estima que contienen 2500 Petagramos (Pg) de C y que pueden fijar entre $1,3 \text{ Pg C año}^{-1}$ a $2,3 \text{ Pg C año}^{-1}$ (Lal, 2004). El suelo desempeña un papel relevante en el ciclo del C y puede representar una fuente importante de CO_2 y de otros gases de efecto invernadero. Estimativamente, la cantidad total de C que contiene el suelo es dos a tres veces superior al contenido en la atmósfera (Bouwman, 1990). Además, dentro de los ecosistemas terrestres, el suelo se considera el mayor reservorio y sumidero de C, en comparación a lo que es capaz de contener o emitir la vegetación (Swift, 2001).

Para dilucidar si una zona se encuentra actuando como sumidero o reservorio, es necesario cuantificar cuales son las tasas a las cuales se capturan y emiten desde y a la atmósfera. Esto se refiere a la identificación de los flujos de C del sitio de estudio. El balance contempla la entrada del compuesto mediante fotosíntesis y la salida a través de diversos procesos, conocidos colectivamente como respiración (Trumbore, 2006), además de pérdidas episódicas de carbono que pueden ocurrir¹.

El ciclo de carbono suelo-atmósfera (Figura 1) comienza con el proceso de fotosíntesis, desarrollado por seres autótrofos que absorben el CO_2 atmosférico transformándolo en C orgánico. Cuando los tejidos de las plantas cumplen su ciclo de vida, el C de éstos, es gradualmente incorporado a la materia orgánica del suelo, mediante la descomposición efectuada por microorganismos. Durante este proceso, una parte del C es devuelto a la atmósfera en forma de CO_2 , mientras que la otra, es transformada en otros compuestos o es almacenada en las propias estructuras microbianas (Pérez *et al.*, 1998).

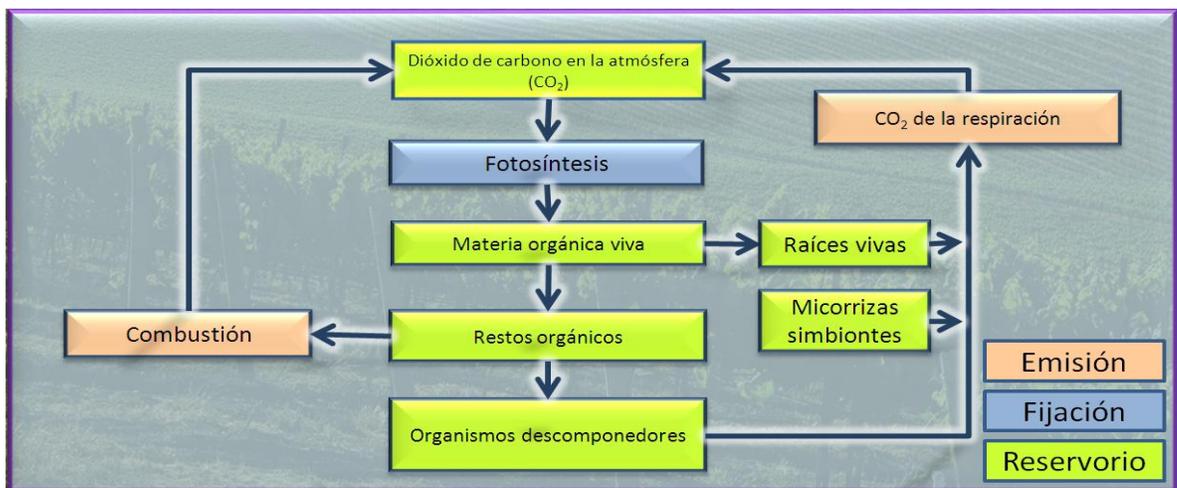


Figura 1. Ciclo del carbono en el ecosistema terrestre.

¹ P.e: Fuego, erosión, o hídrica.

Desde el punto de vista del ecosistema, la respiración del ecosistema (RE) se descompone principalmente en la respiración de las plantas (RP, parte aérea) y la respiración del suelo (RS). La RS se divide en la respiración de raíces (autótrofos), la respiración de microorganismos en los alrededores de la planta, y de la respiración de microorganismos que se encuentran en el suelo y que descomponen los aportes de materia orgánica (heterótrofos) (Trumbore, 2006 y Jassal *et al.*, 2007, LI-COR, 2007) y de la mineralización de C orgánico (Trumbore, 2006). Existen muy pocos estudios basados en mediciones continuas que relacionen la RE y la RS, sin embargo, se ha observado que la RS es la mayor contribuyente a la RE (Jassal *et al.*, 2007). Además, el suelo contiene C del tipo orgánico (SOC, soil organic carbon) e inorgánico (SIC, soil inorganic carbon), siendo el SOC el que presenta el mayor dinamismo como sumidero o fuente debido al proceso continuo de incorporación y descomposición de materia orgánica al suelo (Lal, 2004).

El C del suelo se puede perder en forma gaseosa (CO_2 , CH_4) por difusión directa hacia la atmósfera o por flujo de masa. El aire del suelo tiene una composición similar a la de la atmósfera pero difiere en la concentración de los gases. El aire del suelo tiene una mayor concentración de CO_2 respecto al aire atmosférico (Healy *et al.*, 1996 citado por Martínez, 2007), moviéndose entonces por difusión, se considera que la composición media en volumen de CO_2 atmosférico es de un 0,03% mientras que la composición de este elemento en el suelo varía entre un 0,2 a 3,5% (Navarro y Navarro, 2003). El flujo en masa se produce debido a variaciones de temperatura y de presión entre las distintas capas del suelo y, entre éste y la atmósfera (Healy *et al.*, 1996 citado por Martínez, 2007). Como ejemplo de movimiento en masa producto de cambios de presión, se puede mencionar la acción del viento que se introduce dentro del suelo y succiona aire a la atmósfera o por acción de la lluvia el aire del suelo es expulsado al exterior debido al llenado de los poros del suelo por el agua (UdelaR, s/a). Estos gradientes hacen que entre y salga aire del suelo arrastrando a todos sus componentes. Por otro lado, la difusión corresponde al mecanismo dominante de transporte de gases en el suelo, en este mecanismo el movimiento de cada componente del aire del suelo responde a un gradiente de concentración (Martínez, 2007). Por ejemplo, cuando en el suelo aumenta la producción (o la concentración) de CO_2 , se produce una difusión del CO_2 a la atmósfera y si en el suelo disminuye el O_2 se produce una difusión del O_2 desde la atmósfera al suelo. La difusión depende de cada tipo de gas y de la porosidad del suelo (UdelaR, s/a). Además, la proporción de gases en el suelo varía con el tipo de suelo y con el contenido de humedad, además del grado de actividad de los seres vivos, por lo que estas variables pueden tener un efecto significativo en el movimiento del CO_2 en el suelo (LI-COR, 2007).

La mayoría de los estudios de RS a la fecha han desarrollado ecuaciones empíricas que correlacionan el flujo de CO_2 con variaciones de temperatura y humedad (Trumbore, 2006). Sin embargo, estas ecuaciones sólo logran ajustes adecuados para las zonas en que fueron hechos dichos estudios, ya que existen variados factores, tales como, historia de uso del suelo, mineralogía, disponibilidad de nutrientes, fenología de las plantas y calidad de agregados que hacen diferir la respiración de sitio en sitio (Trumbore, 2006). Producto de

esto, resulta necesario relacionar las variables ambientales que condicionan cada sitio con sus distintas características, tipos de suelo y niveles de composición.

La promoción y utilización de técnicas de agricultura sustentables que permitan capturar C desde la atmósfera, se encuentran incluidas en el protocolo de Kyoto (1998) suscrito por las Naciones Unidas para combatir el cambio climático. El Protocolo de Kyoto reconoce que las emisiones netas de C pueden ser reducidas ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los gases de invernadero o incrementando la tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera. Los suelos agrícolas están entre los mayores depósitos de C del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro de C y de esta manera mitigar la creciente concentración atmosférica de CO₂ (FAO, 2002). Además, existe una creciente preocupación en el mercado global por castigar, a través de la no compra de productos que no han certificado o no han bajado su huella de C; es decir, cuántas emisiones de gases de efecto invernadero liberaron al ambiente al desarrollar, procesar y exportar un producto.

La labranza tradicional (LT) consiste comúnmente en el paso de arado y rastra sobre el suelo con el propósito de facilitar las labores agrícolas. El método de LT implica la inversión de la capa superficial del suelo y la quema de rastrojos no deseados del cultivo anterior (Acevedo y Silva, 2003). Estas prácticas tienen como consecuencia, entre otras, el aumento de C liberado como CO₂ hacia la atmósfera. Ello debido, a que al realizarse la labranza existe una mayor oxidación de la materia orgánica del suelo (MOS) producto de la alta actividad de microorganismos estimulados por el mayor nivel de oxígeno causado por la inversión de la capa de suelo (Acevedo y Silva, 2003), además de la quema de rastrojos. Otra consecuencia de estas prácticas es una mayor exposición del suelo a los principales agentes erosivos (viento y agua). Se estima que la labranza intensiva ha sido responsable de pérdidas de entre 30 y 50% de C orgánico desde la incorporación de nuevos suelos a los sistemas de cultivos tradicionales (Acevedo y Silva, 2003). Según un estudio realizado por Reicosky (1997), distintas intensidades de labranza generaran flujos de C a la atmósfera en distinto grado al momento de realizarse una labranza. Así, el sistema de labranza más invasivo en su estudio registra, en las 5 horas posteriores a la labranza, un flujo de 81 g CO₂ m⁻². Luego, los sistemas menos invasivos registraron una media de 21 g CO₂ m⁻², y por último, la cero labranza (CL) 6 g CO₂ m⁻². Por otra parte, se calcula que las práctica de la LT en Chile ha provocado mermas de suelo por erosión hídrica y eólica, encontrándose actualmente unas 11,5 millones de hectáreas con grado de erosión grave y muy grave (CONAMA, 1994).

LaCL consiste en poner directamente la semilla de los cultivos en el suelo, sin remover los residuos del cultivo anterior (Acevedo y Silva, 2003). Esta práctica tiene como principales ventajas el detener la erosión del suelo, en el largo plazo aumenta la fertilidad disminuyendo los requerimientos de fertilizantes, disminuye la contribución que el suelo hace al CO₂ atmosférico cuando es labrado y por el contrario permite capturar C en el suelo (Acevedo y Silva, 2003). Este sistema de cultivo permite en el largo plazo restablecer y/o aumentar los valores de materia orgánica en el suelo, acumulándose C en tasas decrecientes con el paso del tiempo (Acevedo y Martínez, 2006). Además, cuando la materia orgánica fresca de residuos de plantas está presente en la superficie del suelo, se produce un

incremento de las distintas categorías de la fauna, sobre todo de los descomponedores. Las cadenas alimenticias asociadas a los detritos se ven estimuladas (Hendricks et al., 1986 citado por FAO, 2002), su número se incrementa paralelamente al aumento de la materia orgánica con una disminución del disturbio del suelo, o sea la no labranza (FAO, 2002). Este aumento de las distintas categorías de la fauna, por otro lado, trae consigo un aumento de emisiones de CO₂ producto de la mayor respiración asociada a este incremento de individuos. En Chile se considera que el área de suelos cultivados bajo CL corresponde a 100.000 hectáreas (FAO, 2002), lo cual corresponde al 8% del área total cultivada en el país (ODEPA, 2009).

Monitorear el medio ambiente es útil para la sociedad ya que permite comprender y proyectar los procesos que se desarrollan en el entorno dentro del espacio y tiempo, asimismo mediante datos recabados es posible distinguir y anticipar posibles problemas o amenazas y adoptar distintas posturas o técnicas para resolverlos. Comprender un problema de gran dimensión para la sociedad como el calentamiento global requiere de una amplia suma de datos, obtenidos en distintos lugares y por distintas ramas de las ciencias. Dentro de esta idea, el desarrollo de experimentos que miden cómo se comportan temporal y espacialmente actividades humanas que se contraponen en la forma en que se realizan (como el cultivo en CL y la LT), permite obtener una visión más amplia y acabada de la diferencia que existe entre realizar de una u otra forma dicha actividad. Producto de esto se planteó medir y cuantificar la respiración de suelo, registrada en un período definido de tiempo en los manejos de suelo en CL y LT de un cultivo de habas, así como también encontrar modelos que permitan describir el comportamiento de estos dos manejos, para obtener información sobre la RS en estos dos sistemas de cultivo.

Objetivo general

Comparar la respiración de suelo en sistemas de cero labranza y labranza tradicional en condiciones de secano en la Región Metropolitana.

Objetivos específicos

Cuantificar flujos de CO₂ de suelo en sistemas de cero labranza y labranza tradicional durante la fase final del cultivo de habas.

Relacionar el flujo de CO₂ de suelo con variables predictoras de contenido de agua del suelo, temperatura del suelo, evapotranspiración de cultivo, temperatura del aire y humedad del aire en los sistemas de cero labranza y labranza tradicional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del Sitio de Estudio

El estudio se realizó en la Estación Experimental Antumapu (Figura 2) de la Universidad de Chile ubicada en la Región Metropolitana, provincia de Santiago (33°34'15'' S, 70°38'12'' O). El suelo pertenece a la serie Santiago (Entic haploxeroll, Mollisol), caracterizado por un escaso desarrollo del sub-suelo, bien drenado y sin la existencia de duripán en los primeros 100 cm de suelo (USDA, 1999; USDA, 2003). Corresponde a un suelo de origen aluvial con una clase textural arcillo arenosa (Martínez *et al.*, 2008). El pool de C orgánico para este tipo de suelo se estima en 134 ton/ha, mientras el pool de C inorgánico se estima en 96 ton/ha (Lal, 2004).

Bioclimáticamente, la zona de estudio corresponde a un clima templado Mediterráneo semiárido con veranos secos y cálidos e inviernos fríos, con una media anual de 330 mm de precipitación concentrada principalmente en la época de invierno (junio-septiembre). Las temperaturas máximas y mínimas anuales oscilan entre 28,7 y 3,4 °C respectivamente (Santibañez y Uribe 1990, citado por Martínez *et al.*, 2008).



Figura 2. Cultivo de habas de secano en cero labranza en la Estación Experimental Antumapu, Noviembre 2008.

Condiciones y tratamientos de los cultivos

Los manejos corresponden a tratamientos de suelo trabajados en LT y en CL por 12 años. Se utilizaron 2 parcelas trabajadas en CL y 2 en LT. Todas las parcelas utilizadas para el estudio se encontraban siendo cultivadas con habas (*Vicia faba L.*), especie que pertenece a la familia de las leguminosas (*Papilionáceas*) y que sigue el ciclo fotosintético del tipo C₃.

Cada parcela utilizada era de 5 x 20 m y las mediciones se hicieron entre hileras para no afectar el desarrollo del cultivo.

El suelo en LT fue arado el 31/05/08 con un arado de vertedera y el 09/06/08 fue rastreado con una rastra de discos. Tanto LT como CL fueron sembrados el 17/06/08. La senescencia del cultivo se registró a mediados de noviembre. Durante el período de medición (Octubre-Enero 2008/2009) no se registraron precipitaciones que tuvieran alguna incidencia en las mediciones, por lo que las condiciones ambientales correspondieron a las condiciones normales para la época medida, sin embargo se realizó un riego por aspersión el 18/10/08 octubre del 2008 para simular el efecto de última lluvia, con el fin de obtener un mayor rango de variación de las variables muestreadas.

Equipo de medición y funcionamiento

Para la realización de las mediciones de flujo de CO₂, desde el suelo a la atmósfera, se utilizó el método de cámara dinámica, utilizando el equipo LI-8100 “Automated Soil CO₂ Flux System” (Licor, Nebraska, EEUU) y sus distintos componentes: unidad de análisis y control (UAC), cámara de medición de flujos 8100-103 de 20 cm de diámetro, sensor de temperatura Tipo E y el sensor de humedad ECH₂O modelo EC-5, que mide el porcentaje volumétrico de humedad en el suelo. Este último sensor fue previamente calibrado para las condiciones específicas del terreno. Además, se contó con una Palm (modelo “LifeDrive”, Palm, Sunnyvale, EEUU) que permitió una conexión inalámbrica con la UAC para generar las instrucciones correspondientes para realizar cada una de las mediciones.

Con el método de cámara cerrada se puede lograr una buena cobertura espacial según la distribución de los anillos. Sin embargo, una de sus principales limitaciones es la incapacidad para el operador de medir simultáneamente todos los anillos. También es posible automatizar las mediciones y programarlas durante intervalos de tiempo en forma permanente, sin embargo este tipo de medición no representa adecuadamente la variación espacial de la zona de estudio y solo representa adecuadamente la variación temporal, ya que por lo general el equipo se instala en solo un punto específico (Savage y Davidson, 2003).

Para efectuar las mediciones se instalaron 6 anillos de PVC de 20 cm de diámetro y 15 cm de altura, en cada condición (3 anillos por cada parcela), enterrados en el suelo a una profundidad de 8 cm aproximadamente, los que se mantuvieron fijos durante todo el período de medición. Estos anillos sirvieron de soporte para la cámara de medición de flujo y permitieron un sellado del espacio de medición. Los anillos fueron instalados semi-aleatoriamente entre hileras, según la cobertura promedio de plantas, evitando muestrear cerca de los bordes, para así no generar muestreos anómalos. Se realizó un muestreo antes del riego y cuatro muestreos posteriores a este. El segundo muestreo 23 días de separación con el día regado.

Previo a realizar la toma de datos, se ajustaron los tiempos de medición (duración total de la medición y tiempo de banda muerta) de acuerdo a la curva de respuesta ideal para la zona de estudio. Este tiempo se determinó observando el coeficiente de variación del flujo estimado en terreno, el cual debe ser idealmente menor a un 5%. Se estableció a través de esta curva de respuesta una banda muerta de 30 segundos para permitir que el aire de la cámara se asentara antes de comenzar la medición y un tiempo de medición de 2 a 3 minutos (Figura 3).

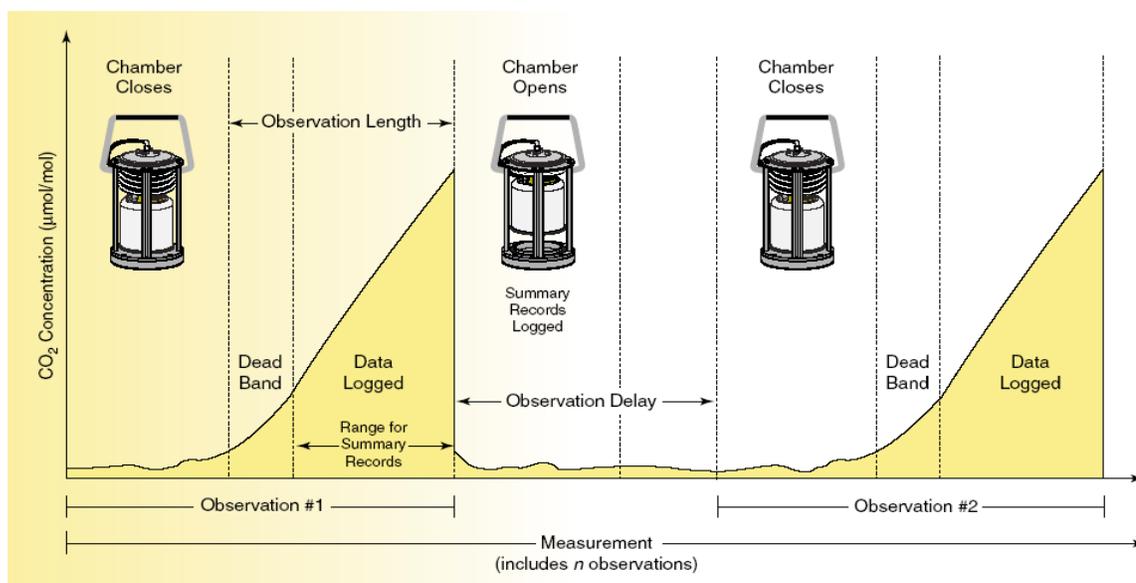


Figura 3. Diagrama del funcionamiento de la cámara de medición de respiración de suelo (LI-COR, 2007).

Para realizar cada medición, se instaló la base de la cámara de medición sobre el anillo y se instalaron también los sensores externos de contenido de H₂O volumétrico del suelo (CV) y Temperatura de suelo (TS), cada uno de ellos enterrados a una profundidad de 5 cm y a una distancia de 30 a 40 cm del anillo. Se tomó esta distancia como adecuada para no generar perturbaciones en el suelo que pudieran producir un aumento de las emisiones de CO₂ en el anillo, que conllevaran a registrar datos sobredimensionados. La TS fue registrada durante cada medición, mientras que el CV fue registrado en las rondas de mayor y menor humedad en el ambiente (1 PM y 4 AM). Luego, mediante la conexión inalámbrica entre la Palm y el equipo, se procedió a dar la instrucción de realizar la medición correspondiente, identificando a qué anillo y ronda (horario del día) correspondió cada medición.

La medición empieza cuando la cámara baja automáticamente sobre la base del anillo hasta sellarse completamente, esto permite evitar la influencia que puede tener sobre la medición la composición de gases del medio ambiente. Aun así, el diseño del equipo permite mantener las condiciones ambientales dentro de la cámara, similares a las condiciones imperantes en el exterior, tales como: Gradiente de difusión de CO₂ suelo-atmósfera, TS, CV y presión atmosférica (LI-COR, 2007). Una vez sellada la cámara, el equipo mediante una bomba de ventilación conduce un flujo de aire desde la cámara de medición a la UAC

para analizar la concentración de CO₂ con un analizador de gases infrarrojo (IRGA), y su tasa de cambio de concentración. Una vez concluida la medición, el equipo genera un registro con una serie de datos, tales como: Fecha juliana, flujo de CO₂, flujo de H₂O, presión atmosférica, TS, CV, Humedad relativa (HR) y Temperatura ambiente (TA), entre otros.

En total se llevaron a cabo cinco campañas de mediciones comenzando en las siguientes fechas: 16-10-08, 11-11-08, 1-12-08, 29-12-08 y 13-01-09 y terminando el día siguiente. En estas campañas se efectuaron las mediciones de flujo de CO₂ para cada sistema de labranza y la medición de cada una de las variables ambientales.

Las mediciones se realizaron de acuerdo al siguiente programa:

- Durante cada campaña se tomaron datos en cada uno de los 6 anillos para ambos tratamientos de cultivo cada tres horas desde las 10:00 hasta las 07:00 horas del día siguiente.

La cantidad de anillos a medir, así como el número de mediciones por campaña y el número de parcelas muestreadas se definieron tomando en consideración el tiempo necesario para poder realizar cada ronda y preparar los equipos para la siguiente ronda, ya que estos debían ser recargados antes de empezar la ronda respectiva.

Relación del flujo de CO₂ con las variables ambientales predictoras.

Se estudió la variabilidad en la RS mediante un modelo de regresión múltiple que considera las siguientes variables: Variables ambientales de contenido de H₂O volumétrico del suelo (CV), temperatura de suelo (TS), humedad relativa (HR), temperatura ambiente (TA) y evapotranspiración de cultivo (ET_c). Las primeras 5 variables fueron obtenidas en terreno a través de los datos entregados por el equipo LI-8100, mientras que los datos de ET_c fueron calculados en forma horaria siguiendo la metodología de FAO Penman-Monteith² (FAO, 2006). Los datos necesarios para el cálculo de la ET_c tales como, temperatura máxima, media y mínima del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento fueron obtenidos de la estación agrometeorológica La Platina, ubicada aproximadamente a 1 km de la zona de estudio.

Una vez obtenidos los datos de ET_c horarios, para cada tratamiento de suelo, estos fueron transformados a mm min⁻¹ y se interpolaron, con el fin de asociarlos a la hora correspondiente de cada uno de los registros obtenidos en terreno, utilizando la fórmula siguiente:

² La metodología seguida para el cálculo de la evapotranspiración es presentada en el anexo 1.

$$ET_{c_i} = ET_{c_{i-1}} + (ET_{c_{i+1}} - ET_{c_{i-1}}) * (t_i - t_{i-1}) * \frac{1}{(t_{i+1} - t_{i-1})}$$

Ecuación 1.

Donde:

ET_{c_i} : Evapotranspiración de cultivo a la hora en que fue tomado el dato correspondiente [mm H₂O min⁻¹].

$ET_{c_{i+1}}$: Evapotranspiración de cultivo horaria posterior [mm H₂O min⁻¹]

$ET_{c_{i-1}}$: Evapotranspiración de cultivo horaria anterior [mm H₂O min⁻¹]

t_i : Hora a la que se midió [min]

t_{i+1} : Dato horario posterior a la medición [min]

t_{i-1} : Dato horario predecesor a la medición [min]

Para la generación de los modelos se consideraron dos escalas temporales distintas. La primera correspondió a explicar la variabilidad horaria del flujo de CO₂ en un día de cada mes y condición de labranza, y la segunda que indica la variabilidad de flujo diaria de CO₂ en el período completo de medición (estacional), para las dos condiciones de labranza.

Para la generación de los modelos se utilizó el método de regresión paso a paso hacia adelante (“Stepwise forward”). Para la escala diaria se consideró como variable dependiente la RS y como variables independientes la TA, HR, TS y ET_c ³ no se incluyó la variable CV por tenerse sólo dos datos por campaña. En cada ronda se obtuvo un promedio de los registros de los 6 anillos representativos de cada condición. Así, se generaron 8 registros por condición representativos de cada una de las rondas realizadas por campaña. Para la escala de medición estacional se consideró además de las variables ya señaladas, la variable CV para generar los modelos y se generó un promedio diario para cada variable, con lo que se obtuvieron 5 registros por condición, cada uno representativo de cada campaña. Además, en la escala diaria los modelos se generaron siguiendo dos criterios diferentes: con restricción de signo y sin restricción de signo. En los modelos con restricción de signo se tomaron en consideración los mejores modelos que no registraron signos negativos en las variables TA, TS y ET_c en la regresión lineal, porque no parece lógico que estas variables se correlacionen negativamente con la RS en esta escala, mientras que en los modelos sin restricción de signo se consideraron los mejores modelos arrojados por el programa sin tomar en consideración el tipo de correlación existente entre la variable dependiente y las variables independientes. En la escala estacional en cambio

³ No se consideró el CV, ya que la variación de esta variable en esta escala es demasiado baja, debido a esto, no se tomaron datos en todas las rondas

sólo se tomó como criterio en los modelos con restricción de signo que ET_c registrara una correlación positiva con la RS, ya que es posible que en esta escala existan correlaciones negativas entre la temperatura (tanto del ambiente como del suelo) y la RS, por el efecto que puede existir en la respiración un cambio importante en la disponibilidad de humedad para ser utilizada por microorganismos y plantas. Por ejemplo, un aumento importante en la humedad podría generar un aumento en la respiración aún cuando se registre una disminución en la TA o TS. Utilizar restricciones de signo permite integrar los conocimientos que existen a priori, con respecto a la correlación de las variables dependientes con la variable independiente, en ese sentido los resultados que se obtienen en los modelos con restricción de signo tendrían que ser mejores que los modelos sin restricción de signo, esto permite obligar al modelo a tomar la dirección deseada.

El método paso a paso hacia adelante consiste en ingresar al modelo cada variable independiente por separado y elegir, en primera instancia, la que mejor se correlaciona con la variable dependiente. Las variables tienen una probabilidad de ingreso de 0,25 y una probabilidad de salida de 0,1. En el siguiente paso, entra otra variable independiente al modelo, el requisito de entrada y que mejora el R^2 o que disminuye la suma del cuadrado de error del modelo. Cada vez que una variable entra al modelo, las variables que habían sido seleccionadas, en primera instancia, son analizadas desde la perspectiva del criterio de salida. El proceso termina cuando ninguna de las variables restantes cumplen los criterios de entrada y las variables que fueron seleccionadas para el modelo no cumplen el criterio de salida (Pardo y Ruiz, 2002; Morales, 2005, citado por Llambías, 2010). Una vez obtenidos los modelos, se estimó la relevancia estadística de estos con un nivel de confianza de 95% ($\alpha=0,05$). Además, se verificó también que los modelos cumplieran la hipótesis de regresión lineal con los mismos niveles de confianza y significancia mencionados, para esto se realizaron análisis de residuales comprobando normalidad (N, test de Shapiro-Wilks, p-valor $> 0,05$), independencia (I, test de Durbin-Watson, DW cercano a 2 y p-valor $>0,05$) y homocedasticidad (H, graficando los residuales y valores estimados de la variable dependiente, existe homocedasticidad cuando la nube de puntos se reparte equitativamente alrededor de los valores estimados), basado en las recomendaciones de Morales (2008), citado por Llambías (2010).

Tratamiento de los datos

En total se generaron 480 registros, 96 registros por campaña y 48 registros por condición para cada campaña. Estos registros fueron agrupados y ordenados en una tabla Excel para luego ser ingresados al programa estadístico JMP 5.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Posteriormente se procedió a detectar la existencia de datos anómalos en las mediciones efectuadas. En primera instancia, se revisaron los registros en busca de datos que registraran valores incongruentes, como por ejemplo valores negativos de temperaturas de

suelo, contenido H₂O volumétrico del suelo, humedad relativa o errores en la determinación de la respiración de suelo⁴. Con este procedimiento no se detectaron valores anómalos.

Se utilizó el método de “Mahalanobis distance” para detectar datos fuera de rango. Este método consiste en la detección de valores fuera de rango calculando la distancia de cada caso con respecto a un centroide de todos los casos; si un valor supera un límite crítico definido según el número de variables y de registros, es considerado fuera de rango (Vivanco,1999). Se escogió este método para detectar datos anómalos ya que cuando existen variables fuertemente correlacionadas, es posible que un dato erróneo de una variable pase inadvertido si no se considera su desempeño con respecto al resto de las variables medidas (Tabachnick and Fidell, 1996). Para el desarrollo de este método se agruparon los registros de acuerdo a la condición a la que pertenecen y se analizaron las variables siguientes: Flujo de CO₂, humedad relativa promedio, concentración de CO₂, flujo de H₂O promedio, presión atmosférica promedio, temperatura ambiente promedio, temperatura de suelo promedio⁵. A través de este método se eliminaron 12 registros por encontrarse fuera de rango.

Con respecto a las regresiones realizadas para generar los modelos de respiración diaria, se obtuvieron modelos que no se ajustaban. En otras palabras el software no fue capaz de ajustar una curva para dichas variables y registros. Se trató de resolver este problema, re-analizando los modelos que no obtuvieron un ajuste adecuado; para esto se agruparon los registros de los seis anillos instalados en el sistema de labranza respectivo para cada una de las ocho rondas medidas, se buscó para cada ronda algún anillo que registrara algún valor extremo que pudiera generar una variación importante en el promedio de la ronda, que produjera el posterior desajuste del modelo. Para determinar esto se realizaron regresiones para cada ronda y se eliminaron los registros del anillo que generaron residuales fuera de rango en dicha ronda. Con este método se eliminaron 4 registros y se lograron ajustar 2 modelos que en primera instancia no lograron un ajuste adecuado.

Cuantificación del flujo de CO₂ desde el suelo a la atmósfera

Para estimar la respiración de suelo diaria (RSD) promedio, para cada campaña y tratamiento, se calculó el flujo diario en cada uno de los 6 anillos que se midieron por tratamiento. Para reemplazar los datos que fueron previamente eliminados por encontrarse fuera de rango, se realizó una interpolación entre el dato anterior y el dato posterior al eliminado. Además, para obtener un registro de 24 horas se replicó el valor de la primera ronda para asignarlo a una ronda 9 ficticia correspondiente a las 10:00 del día siguiente.

Para cuantificar la RSD promedio se utilizó el método de suma trapezoidal (ecuación 2), el cual permitió determinar el área bajo la curva de la RS de las 9 rondas.

⁴ El equipo señala si se produjo un error en la medición de la respiración de suelo.

⁵ La descripción de las variables mencionadas es presentada en el anexo 2.

$$RSD = \sum_{i=1}^{i=9} RS_i * (t_{i+1} - t_i) + 0,5 * (RS_{i+1} - RS_i) * (t_{i+1} - t_i)$$

Ecuación 2.

Donde:

RSD: Respiración de suelo diaria [g CO₂ m⁻² día⁻¹]

RS_i: Respiración de suelo en la ronda i [g CO₂ m⁻² s⁻¹]

RS_{i+1}: Respiración de suelo en la ronda siguiente [g CO₂ m⁻² s⁻¹]

T_i: Hora en que se midió la RS en la ronda i [s]

T_{i+1}: Hora de medición de la ronda siguiente a i [s]

Una vez obtenido el flujo diario de cada anillo, se promediaron los resultados obtenidos en cada uno de los 6 anillos, para obtener la RSD por tratamiento para cada campaña.

Finalmente, se cuantificó la respiración de suelo del período medido (RSPM) a través de la siguiente ecuación.

$$RSPM = \sum_{i=1}^{i=5} RSD_i * (t_{i+1} - t_i) + 0,5 * (RSD_{i+1} - RSD_i) * (t_{i+1} - t_i)$$

Ecuación 3.

Donde:

RSPM: Respiración de suelo del período medido [g CO₂ m⁻² período⁻¹]

RSD_i: Respiración de suelo diaria en la campaña i [g CO₂ m⁻² día⁻¹]

RSD_{i+1}: Respiración de suelo en la campaña siguiente [g CO₂ m⁻² día⁻¹]

T_i: Día en que se midió RSD en la ronda i [día]

T_{i+1}: Día de medición de suelo en la campaña siguiente a i [día]

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relación del flujo de CO₂ con las variables ambientales predictoras

Flujo diario

Para ilustrar y describir el comportamiento diario observado en cada una de las campañas para cada variable en la escala diaria, se presenta en la Figura 4 la curva de comportamiento de respiración de suelo diaria, evapotranspiración de cultivo, temperatura ambiente, temperatura de suelo, contenido H₂O volumétrico del suelo y humedad relativa del aire en la primera campaña 1⁶.

La RSD, para cada anillo y campaña, presentó una curva de comportamiento acampanada. Los flujos menores se obtuvieron en los horarios nocturnos, mientras que a partir de la madrugada se genera un aumento hasta llegar a un pico ubicado entre el mediodía y las 17 horas. A partir de ese punto se observa un descenso gradual de las emisiones. Algunas campañas (campañas 1, 4 y 5) mostraron esta tendencia más acentuada que otras (campañas 2 y 3). Este comportamiento horario es el comportamiento normal observado de la curva de RSD, en diversos climas, descrito por distintos autores (LI-COR, 2007; Evans et al, 2008; Llambías, 2010). Además, en la última ronda de las 7:00 am de cada campaña (Apéndice 1) se registra un notorio incremento en la tasa de emisiones en LT con respecto a CL, lo que probablemente se encontraría relacionado con la mayor desprotección del suelo en este tratamiento producto de la mayor existencia de grietas en el suelo, al movimiento en masa de gases generado por el izamiento del viento a esa hora del día.

Con respecto al comportamiento de las variables ambientales medidas, se observó una diferencia en la TS entre los dos tratamientos en el horario diurno. En todas las campañas, LT registró una TS de entre 3 a 10 grados superior a CL, mientras que en el período nocturno no se registraron grandes diferencias, esta diferencia se genera producto de la protección que entrega el mantillo de rastrojos al suelo en CL que disminuye la temperatura del suelo. En el resto de las variables muestreadas no se observaron diferencias notorias entre los sistemas de labranza. Con respecto a la ET_c calculada, se encontró que en LT se generó una mayor ET_c que en CL. Esto también se encuentra relacionado con el mantillo de rastrojos esparcido sobre la superficie, que reduce la pérdida de agua por evaporación en la superficie del suelo (FAO, 2006) y que en este estudio se estableció que reducción correspondió a un 30% en CL con respecto a LT (pag. 45).

⁶ En Apéndice 1, se presentan todas las curvas de cada una de las variables muestreadas para cada campaña.

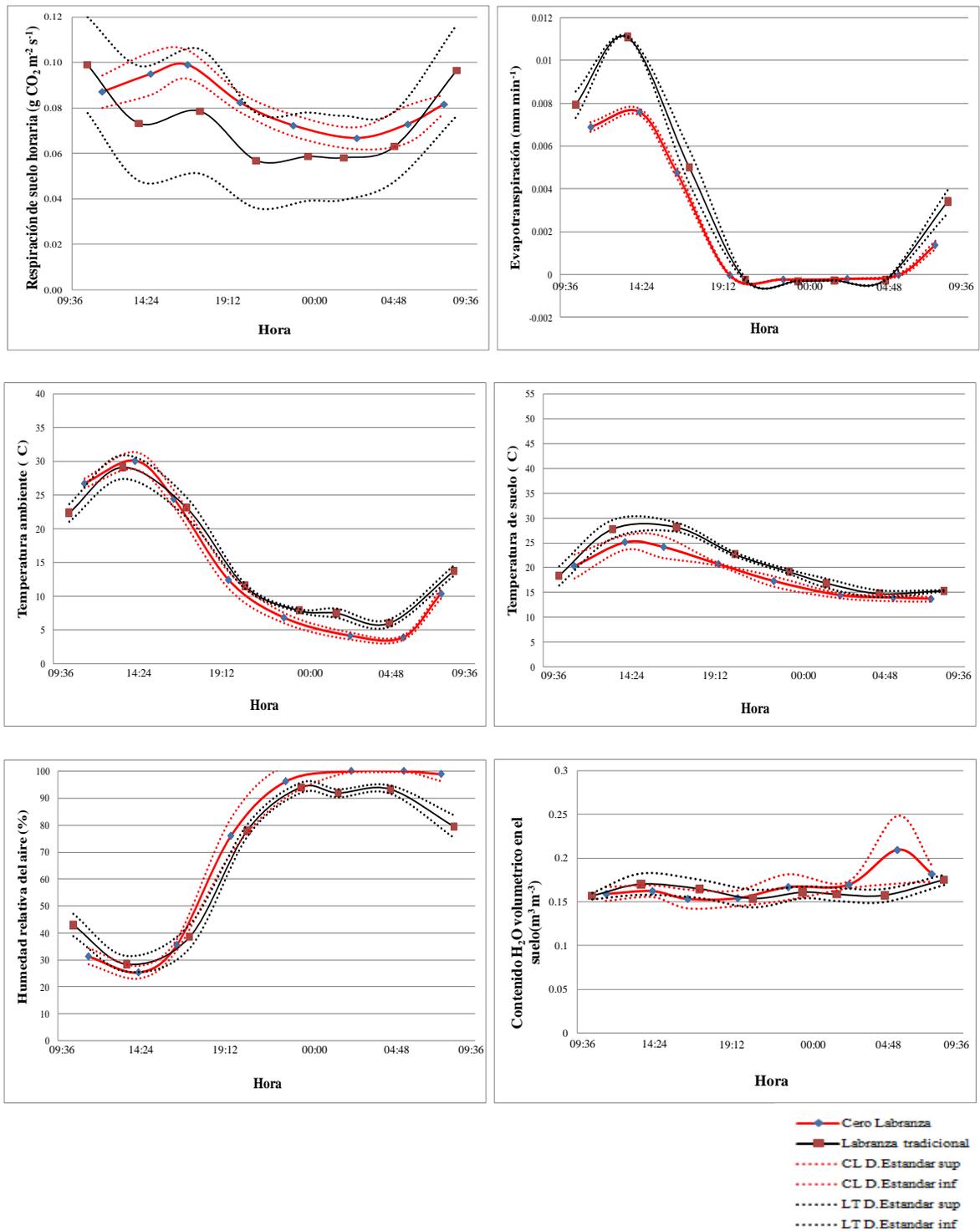


Figura 4. Comportamiento diario de respiración de suelo, evapotranspiración de cultivo, temperatura ambiente temperatura de suelo, contenido H_2O volumétrico del suelo y humedad relativa del aire en cero labranza y labranza tradicional para la primera campaña de mediciones.

La variable CV no fue seleccionada para los modelos de escala temporal diaria, ya que en esta escala no se aprecia una fluctuación notoria en el CV, producto de los bajos cambios de humedad del terreno en un ciclo de 24 horas. Los valores obtenidos para esta variable se mantuvieron generalmente constantes para todo el período de medición, fluctuando entre un 14 y 17 % de contenido volumétrico de agua en suelo.

Con respecto a los modelos sin restricción de signo, se lograron generar para esta escala, 8 de 10 modelos posibles. Las campañas 2 y 3, en LT, no lograron ser ajustadas adecuadamente. Los análisis de residuales para los modelos se comportaron correctamente, salvo en la campaña 5 de LT, donde no se obtuvo independencia entre los datos. Los ajustes obtenidos para el resto de los modelos fueron adecuados, con un R^2 ajustado que varió entre 0,78 y 0,99. Se obtuvieron en total 7 modelos significativos. En 5 de los 8 modelos obtenidos, la primera variable seleccionada correspondió a TA mientras que para los otros 3 modelos, ET_c fue la variable seleccionada en primera instancia. La segunda variable seleccionada correspondió 6 veces a TS y 1 vez a ET_c (Cuadro 1). La explicación de que TA y TS sean las variables más seleccionadas en esta escala, radicaría en que la respiración y metabolismo de los seres vivos se encuentra fuertemente relacionada con la temperatura, por lo que la emisión de CO_2 se relaciona por igual con la temperatura (LICOR, 2007), y además, el aumento de la temperatura generaría una condición más propicia para el movimiento de gases entre los distintos horizontes del suelo y la atmósfera, producto del fenómeno conocido como movimiento de masa. Además, en esta escala la variable ET_c no logra una buena correlación con la variable RS, posiblemente porque estas curvas se relacionan en una escala distinta con la influencia de la radiación en el transcurso del día, o porque la RS presenta una mayor variabilidad en esta escala por ser obtenida de datos medidos, promediándose los valores registrados en cada uno de los anillos, mientras que la ET_c de cada anillo es generada de una curva única calculada interpolando entre los datos horarios calculados, lo que genera que el promedio de ET_c tenga una menor variabilidad. Esto finalmente genera que la curva de RS tenga cambios más abruptos entre cada punto mientras que la curva de ET_c tiene una menor variación, que se expresa en una curva más suavizada (Figura 4).

Los modelos con restricción de signo tuvieron, como era de esperarse por agregarse una restricción, una menor correlación, sin embargo estos serían más precisos, lográndose, al igual que los modelos sin restricción de signo, 8 de los 10 modelos posibles, pero de estos, 4 modelos tuvieron un R^2 ajustado bajo 0,2. El R^2 de los otros 4 modelos varió entre 0,87 y 0,39. Se obtuvieron 2 modelos con análisis de residuales adecuados, es decir, que cumplieron con las hipótesis de regresión lineal, estos correspondieron a los mismos modelos obtenidos en el análisis hecho sin restricción de signo, y se obtuvieron 3 modelos significativos de los 8 posibles. En 5 de los 8 modelos la primera variable seleccionada correspondió a TA mientras que en los otros 3 modelos, ET_c fue la variable seleccionada en primera instancia (Cuadro 2.)

Cuadro 1. Modelos de Respiración de suelo diario sin restricción de signo por campaña y condición (Octubre, 2008 – Enero, 2009).

Condición	Campaña	Variables seleccionadas regresión paso a paso				Modelo de regresión lineal para respiración (mg m ⁻² s ⁻¹)	R ² ajustado	Análisis de residuales			n	n _{max}	Significancia del modelo*
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a			N	I	H			
CL	1	TA				0,00097*TA+0,068	0,81	Si	Si	Si	8	8	*
CL	2	TA	TS	ET _c	HR	0,0057*TA-0,001*TS-6,6*ET _c +0,001*HR-0,08	0,79	Si	Si	Si	8	8	
CL	3	TA	TS	ET _c		0,00175*TA-0,0128*TS-7,75*ET _c +0,0601	0,96	Si	Si	Si	8	8	*
CL	4	ET _c				9,539*ET _c +0,0441	0,79	Si	Si	Si	8	8	*
CL	5	TA	TS	ET _c		0,00226*TA-0,00134*TS+3,0055*ET _c +0,03536	0,99	Si	Si	Si	8	8	*
LT	1	ET _c	TS	TA		-10,53*ET _c -0,00655*TS+0,00885*TA+0,10577	0,87	Si	Si	Si	8	8	*
LT	2	-				No se obtuvo ajuste	-	-	-	-	8	8	-
LT	3	-				No se obtuvo ajuste	-	-	-	-	8	8	-
LT	4	ET _c	TS	TA		4,243*ET _c -0,0034*TS+0,0037*TA+0,0384	0,8	Si	Si	Si	8	8	*
LT	5	TA	TS	ET _c		0,004*TA-0,0034*TS+8,526*ET _c +0,0588	0,9	Si	No	Si	8	8	*

* P-valor <0,05

N: Normalidad, test de Shapiro-Wilks; I: Independencia, test de Durbin-Watson; H: Homocedasticidad, observación visual de residuales; n: Numero de registros utilizados para generar el modelo; n_{max}: Número máximo posible de registros para desarrollar el modelo.

CL: Cero labranza; LT: Labranza tradicional; CV: Contenido de H₂O volumétrico del suelo; TS: Temperatura de suelo; HR: Humedad relativa del aire; TA: Temperatura ambiente; ET_c: Evapotranspiración de cultivo.

Las variables TA y TS se encuentran en Grados Celsius, la variable ET_c en mm min⁻¹, HR en porcentaje y la variable RS en mg m⁻² seg⁻¹.

Cuadro 2. Modelos de Respiración de suelo diario con restricción de signo por campaña y condición (Octubre, 2008 – Enero, 2009).

Condición	Campaña	Variables seleccionadas regresión paso a paso				Modelo de regresión lineal para respiración (mg m ⁻² s ⁻¹)	R ² ajustado	Análisis de residuales			n	n _{max}	Significancia del modelo*
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a			N	I	H			
CL	1	TA				0,00097*TA+0,068	0,81	Si	Si	Si	8	8	*
CL	2	TA				0,00033*TA+0,061	0,18	No	No	No	8	8	
CL	3	TA				0,00039*TA+0,046	0,39	Si	No	No	8	8	
CL	4	ET _c				9,539*ET _c +0,0441	0,79	Si	Si	Si	8	8	*
CL	5	TA	HR			0,0034*TA+0,0008*HR-0,0683	0,87	Si	No	Si	8	8	*
LT	1	ET _c				2,09*ET _c +0,066	0,18	Si	No	Si	8	8	
LT	2	-				No se obtuvo ajuste	-	-	-	-	8	8	-
LT	3	-				No se obtuvo ajuste	-	-	-	-	8	8	-
LT	4	ET _c				5,04*ET _c +0,0377	0,17	No	No	No	8	8	
LT	5	TA				0,000933*TA+0,025	0,1	No	Si	No	8	8	

* P-valor <0,05

N: Normalidad, test de Shapiro-Wilks; I: Independencia, test de Durbin-Watson; H: Homocedasticidad, observación visual de residuales; n: Numero de registros utilizados para generar el modelo; nmax: Número máximo posible de registros para desarrollar el modelo.

CL: Cero labranza; LT: Labranza tradicional; CV: Contenido de H₂O volumétrico del suelo; TS: Temperatura de suelo; HR: Humedad relativa del aire; TA: Temperatura ambiente; ET_c: Evapotranspiración de cultivo.

Las variables TA y TS se encuentran en Grados Celsius, la variable ET en mm min⁻¹, HR en porcentaje y la variable RS en mg m⁻² seg⁻¹.

Flujo estacional

En la escala estacional, la tendencia generalizada de la RS correspondió a una disminución progresiva en la transición primavera-verano. En el suelo bajo tratamiento en CL, la disminución de emisiones fue progresiva pero a un menor ritmo en las últimas 3 campañas, mientras que en LT se registró una disminución en las 3 primeras campañas y un leve aumento en las 2 campañas siguientes. La curva descrita de RS en las dos condiciones se asemejó en cierto grado a la curva de ET_c , curva que es altamente sensible en primer grado al estado de desarrollo del cultivo y en segundo grado a la variación de la radiación solar incidente. Producto de esto, las dos primeras campañas registraron una notoria mayor respiración ya que el cultivo se encontraba en su etapa media de desarrollo, mientras que el cultivo a partir de la tercera campaña de mediciones se encontró en su etapa final de desarrollo con un alto porcentaje de plantas senescentes. La explicación a que se registrara un valor mínimo tanto en la ET_c como en la RS en la tercera campaña de LT, se debería por un lado, a que correspondió a la etapa final de cultivo, y además a que en ese día se registró una mayor nubosidad con respecto a las dos últimas campañas que corresponden a la misma etapa de desarrollo de cultivo y en las cuales se hubiera esperado obtener una menor RS producto de la transición entre primavera y verano, esta menor radiación solar incidente en el medio implicó que se registrara tanto, una menor ET_c , como también, una menor actividad de plantas y microorganismos que derivó en una menor RS. En CL en cambio el mínimo de respiración se obtuvo en la quinta campaña y no en la tercera campaña como hubiera sido esperable tomando en consideración las condiciones ambientales y el estado de desarrollo del cultivo. Esta diferencia con respecto al comportamiento registrado en LT, podría deberse a que la senescencia completa del cultivo en CL se registró con posterioridad, lo que atenuó la disminución de la RS en la tercera campaña (Figura 5).

La TA promedio varió entre 15 y 25 °C, mientras que la TS diaria promedio varió entre 19 y 34 °C. El tratamiento en LT tuvo un valor promedio diario para esta variable de entre 1 a 4 °C más que CL. Estas dos variables tuvieron una clara tendencia al alza en la transición primavera-verano. La HR promedio diaria fluctuó entre 66 y 40%, mientras que el CV promedio diario se mantuvo entre un 14 y 17 %. La ET_c diaria promedio tuvo una fluctuación decreciente que varió entre 5,5 y 1 mm diario. La ET_c en LT fue entre 1,2 y 0,5 mm diarios mayor que en CL (Figura 5). Cabe señalar que existió una limitación en el cálculo de la ET_c , ya que no se trabajó en una condición de regadío a capacidad de campo, como tampoco se contó con un estudio de agotamiento de agua en el suelo, por lo que no se pudo establecer el efecto de la limitación de agua en el cultivo en la cantidad de agua evapotranspirada. Esta limitación, sin embargo, habría generado sólo que los valores de evapotranspiración se encuentren levemente subvalorados y no tendría una gran relevancia en la confección de los modelos ni en la forma de la curva, ya que el efecto de agotamiento de agua aprovechable por el cultivo, se encuentra incorporado en el coeficiente de cultivo (K_c) que se utiliza para señalar la etapa de desarrollo del cultivo⁷.

⁷ La explicación del K_c utilizado se encuentra detallado en el anexo 1.

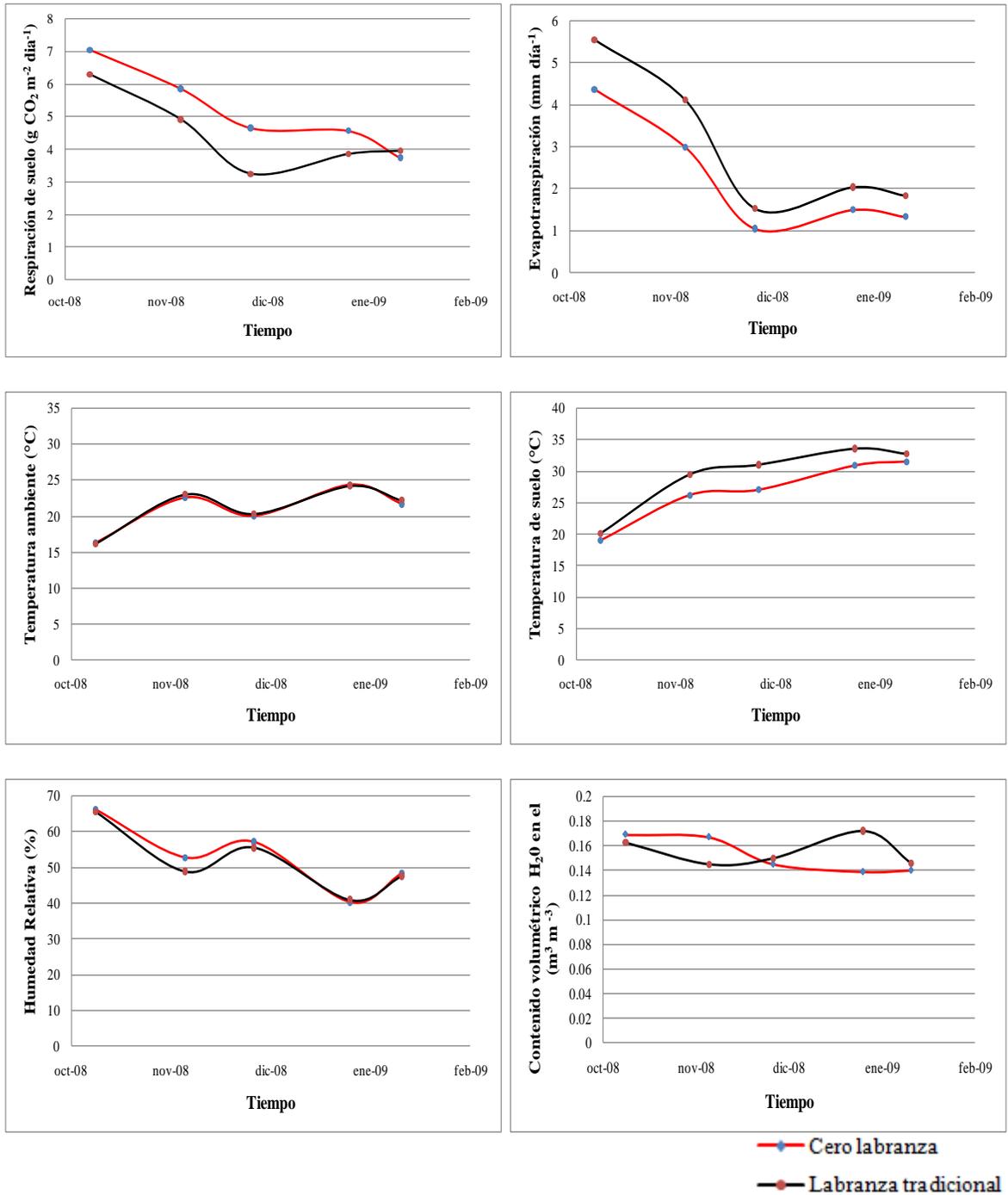


Figura 5. Comportamiento de respiración de suelo, evapotranspiración de cultivo, temperatura ambiente, temperatura de suelo, humedad relativa, y contenido H_2O volumétrico del suelo, en cero labranza y labranza tradicional durante octubre-enero 2008-2009.

Los dos modelos generados en esta escala fueron significativos encontrándose la mejor correlación lineal entre la RSPM y la variable ET_c , obteniéndose en CL un R^2 ajustado de 0,85 y en LT un R^2 ajustado de 0,95. Además, los análisis de residuales fueron correctos (Cuadro 3). Ahora bien, desde el punto de vista práctico con respecto a la modelación de la RS, que la ET_c sea la variable que mejor se correlaciona con esta variable en esta escala, no resulta ser muy bueno ya que es bastante complicado estimar esta variable, debido a que es necesario registrar datos cada 10 minutos o más seguidos aún para obtener una buena estimación de la ET_c (Jorge Pérez, comunicación personal), sin embargo la ventaja que tiene usar la ET_c para describir la RS es que se pueden aprovechar datos registrados de forma continua en estaciones que monitorean las variables necesarias para calcular la ET_c , por lo que se podrían obtener buenas y más precisas correlaciones a escala anual, sin embargo no todas las zonas geográficas cuenta con una estación de monitoreo cercana. Esta correlación entre la RS y la ET_c podría permitir también generar índices estimativos de RS para distintos tipos de cultivos a partir de la evapotranspiración registrada en el cultivo de referencia (ET_o), claro que para que estos índices funcionaran, tendría que tomarse en consideración, que sería necesario establecer condiciones estándares de diseño del cultivo y de composición del terreno⁸. Posteriormente estos índices podrían ser adecuados según las condiciones particulares de terreno donde se desea saber el flujo de CO_2 . Sin embargo, no es claro si desarrollar estos índices sería lo óptimo, ya que por la complejidad que implicaría generarlos sería necesaria una inversión importante en investigación, por lo que trabajar a escala local con modelos más sencillos sería quizás más aconsejable.

⁸ Tipo de suelo, niveles de nutrientes en el suelo, riegos, densidad de cultivo.

Cuadro 3. Modelos de Respiración de suelo en el período medido por condición, (Octubre, 2008 – Enero, 2009).

Condición	Variables seleccionadas regresión paso a paso					Modelo de regresión lineal para respiración ($\text{gr m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	R^2 ajustado	Análisis de residuales			n	n_{max}	Significancia del modelo*
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a			N	I	H			
CL	ET _c					$0,8691*ET_c+3,22247$	0,86	Si	Si	Si	5	5	*
LT	ET _c					$0,6705*ET_c+2,433$	0,95	Si	Si	Si	5	5	*

* P-valor <0,05

N: Normalidad, test de Shapiro-Wilks; I: Independencia, test de Durbin-Watson; H: Homocedasticidad, observación residual de residuales; n: Numero de registros utilizados para generar el modelo; n_{max} : Número máximo de registros para desarrollar el modelo.

CL: Cero labranza; LT: Labranza tradicional; CV: Contenido de H₂O volumétrico del suelo; TS: Temperatura de suelo; HR: Humedad relativa del aire; TA: Temperatura ambiente; ET_c: Evapotranspiración de cultivo.

La variable ET_c se encuentra en mm día^{-1} y la variable RS en $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

Cuantificación del flujo de CO₂ desde el suelo a la atmósfera en los sistemas cero labranza y labranza tradicional

Los rangos de respiración diarios variaron entre 7 g de CO₂ m⁻² día⁻¹ (Octubre, 2008) y 3,5 g de CO₂ m⁻² día⁻¹ (Enero, 2009) para CL y 6,3 g de CO₂ m⁻² día⁻¹ (Octubre, 2008) y 3,25 g de CO₂ m⁻² día⁻¹ (Diciembre, 2008) para LT. Baldocchi y Tang (2005) obtuvieron resultados similares en cuanto al cambio estacional de emisiones, en un estudio que realizaron en un ecosistema de sabana de robles y herbáceas (“Oak-grass savanna”) de California (clima mediterráneo). En este estudio también registraron una tendencia negativa de RS en la transición primavera-verano, con un promedio de 3,3 g de CO₂ m⁻² día⁻¹, mientras que en la transición otoño-invierno registraron una tendencia positiva, con una media de 8,7 g de CO₂ m⁻² día⁻¹. También registraron aumentos importantes en la respiración después de cada evento pluviométrico. En otro estudio, realizado por Mo *et al.* (2005), en un bosque templado frío de Japón, ocurre lo contrario en cuanto a la época en la cual se registran los mayores flujos de respiración, obteniéndose los máximos de RS de 4,6 a 6,0 g de CO₂ m⁻² día⁻¹, en el período de primavera-verano, para luego registrarse en otoño rangos de 1,5 a 2,5 g de CO₂ m⁻² día⁻¹. Sin embargo, en este caso, los meses de verano además de presentar las mayores temperaturas del aire (25 °C en promedio), presentan un gran aporte pluviométrico, por ende en esta época se tiene una alta radiación traducida en una alta temperatura y humedad. Por otro lado en un matorral árido de la región bioclimática mediterránea desértico-oceánica de Chile, de alta radiación y baja humedad se obtienen bajos flujos de respiración en el período de verano de entre 0,13 g de CO₂ m⁻² día⁻¹ y 1,32 g de CO₂ m⁻² día⁻¹ mientras que en la estación húmeda del período de invierno se obtienen mayores flujos de entre 1,1 g de CO₂ m⁻² día⁻¹ y 7,48 g de CO₂ m⁻² día⁻¹ (Jorge Pérez, comunicación personal de datos no publicados del proyecto FONDECYT 11070101). Se podrían generalizar estos casos señalando que la presencia de agua en el ecosistema cumple un importante rol en el proceso metabólico de plantas y microorganismos, permitiendo una mayor actividad de estos.

Con respecto a las diferencias registradas de RS, entre los dos tratamientos, en promedio en las primeras 4 campañas (octubre-diciembre) se registró un flujo diario de CO₂ mayor en la parcela bajo el tratamiento en CL, mientras que en la última campaña se registró un flujo levemente superior en LT (Figura 6). Como este cambio de tendencia se registró en la última campaña no hay una clara explicación para este cambio, pero podría suponerse que se debe a una disminución de la respiración de organismos descomponedores en CL.

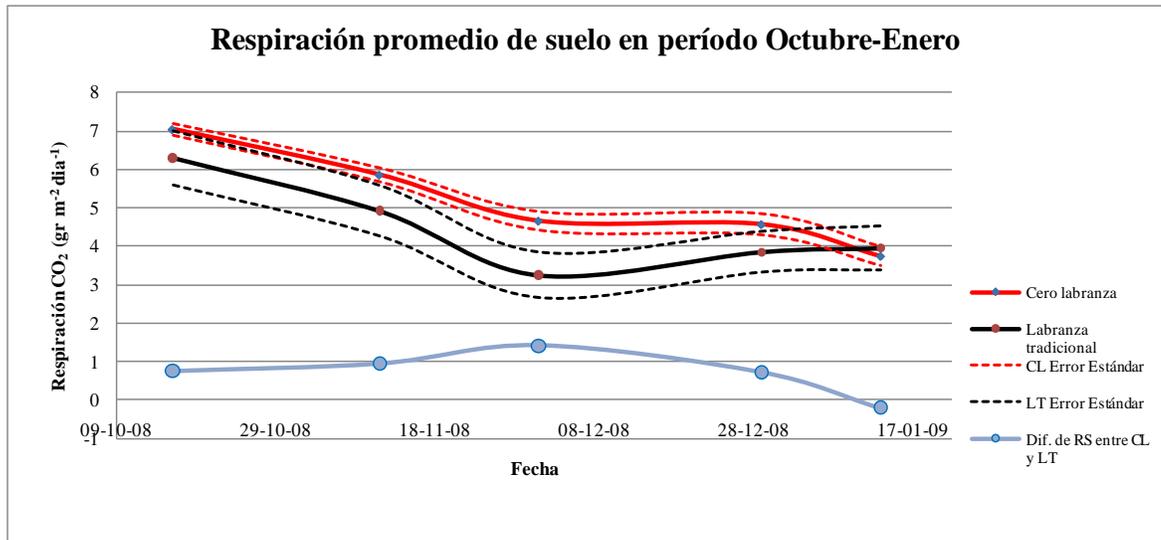


Figura 6. Respiración de suelo en período medido, (Octubre, 2008 – Enero, 2009).

Es necesario destacar que mientras en el tratamiento en CL se registraron rangos de respiración similares entre las dos parcelas utilizadas, en LT se registró una diferencia de la respiración de 2 a 3 g de CO₂ m⁻² s⁻¹ entre cada parcela (Figura 7).

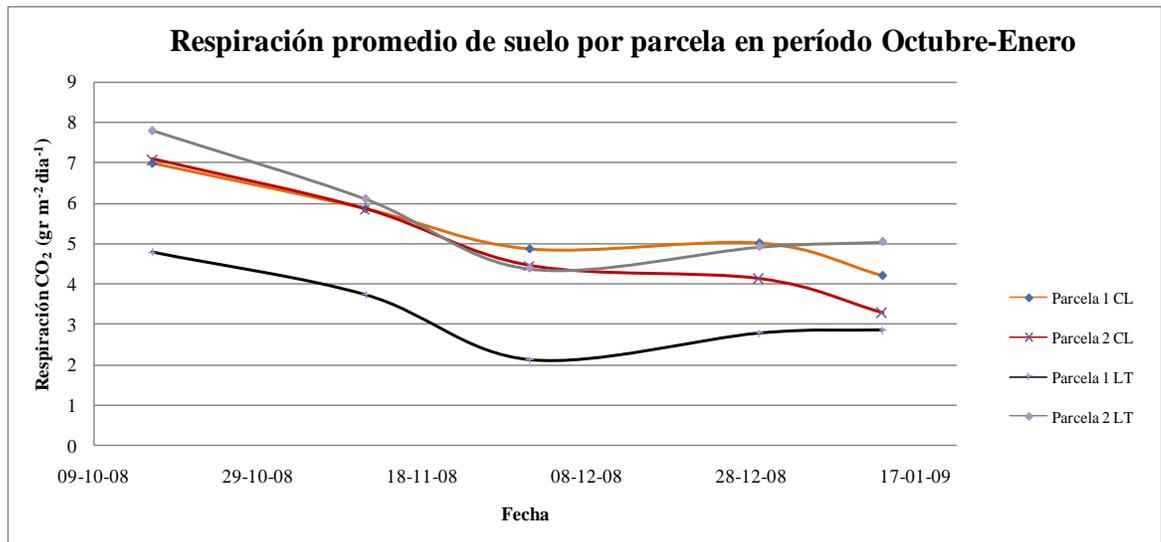


Figura 7. Respiración de suelo en el período medido por parcela, (Octubre, 2008 – Enero, 2009).

Esta diferencia en la magnitud en la RS, entre las 2 parcelas manejadas en LT, se debería a una mayor variabilidad espacial de las emisiones producto de la labranza. Esta variabilidad también fue observada por Llambías (2010) en un estudio de emisiones de suelo en una condición natural y otra forestada, realizado en el Campo Experimental Agronómico Las Cardas, ubicado en la Región de Coquimbo, Chile. Los datos que obtuvo en la condición

natural fueron más estables que en la condición forestada, condición que fue intervenida para construir camellones para realizar la reforestación.

Finalmente, se contabilizó para el período medido (11, octubre 2008 – 16, enero 2009) en el suelo con habas, tratadas en CL, una emisión a la atmósfera de 389 g m^{-2} de CO_2 . Mientras que, en el suelo tratado en LT se registró una emisión de 319 g m^{-2} de CO_2 . Esto representó un flujo de CO_2 un 21,7% mayor en CL que en LT. Esta diferencia en la emisión de CO_2 por tratamiento, podría estar fuertemente relacionada con la materia orgánica en el suelo (MO) la cual es utilizada como fuente de energía por la fauna descomponedora. Un estudio químico de suelo efectuado en el mismo sitio por el laboratorio de Suelo-Agua-Planta (SAP), el 26 de junio del 2008, concluyó que para esa fecha en CL el suelo contenía 2,52% de MO en los primeros 15 cm, mientras que en LT se registró un 2,09 % de MO, lo que representó un 23,9 % más de MO en el primer tratamiento. Además, la biomasa total generada por el cultivo en LT correspondió a $1,5 \text{ T Ha}^{-1}$ en promedio, mientras que en CL la biomasa promedio producida fue de $1,4 \text{ T Ha}^{-1}$ (Datos del laboratorio SAP), por lo que la mayor RS registrada en CL no podría deberse a una mayor actividad del cultivo en este tratamiento, sino que se debería principalmente a la mayor actividad de los organismos descomponedores del suelo. Se podría establecer una relación cuantitativa entre distintos contenidos de MO en el suelo o del contenido de carbono orgánico en el suelo (SOC), y el flujo de CO_2 suelo-atmosfera. Frank *et al.* (2004), obtiene que el SOC y el contenido de C en la biomasa de microorganismos (MBC), tiene un rol significativo en la emisión de CO_2 debida a la RS, ya que los suelos en su estudio, que contuvieron más SOC y más MBC, registraron una mayor RS.

Los resultados obtenidos de RS no son concluyentes, en el sentido de que estos solo corresponden a resultados parciales de un período acotado del año y tampoco incorporan los efectos en la RS debidos a trabajos de labranza, por lo que la tendencia de generarse una mayor respiración en el manejo bajo CL podría verse revertida en el resto del período, además el hecho de que exista una mayor RS en CL implicaría también una mayor fijación por parte de los organismos descomponedores de C orgánico en el suelo.

Se sugiere para próximas investigaciones incorporar nuevas variables que puedan estar asociadas a la RS, tales como, profundidad de mantillo, análisis químico de suelo, biomasa promedio por tratamiento y biomasa de raíces. Realizar también, mediciones en condiciones similares⁹ para los meses no medidos, con el fin de completar los modelos de comportamiento horario para cada mes, como también, generar un modelo que represente el comportamiento de la rotación del cultivo de habas, y también, cuantificar las emisiones de dichos meses. Además, se sugiere asociar los resultados obtenidos con estudios de emisión de CO_2 post-labranza de suelo ya que aunque LT registra una menor RS en el período de cultivo medido entre octubre y enero, en el periodo inmediato a la post-labranza se registra un aumento considerable del flujo de CO_2 asociado a la labranza (Martínez, 2007). Finalmente, se recomienda, corroborar los modelos obtenidos para el mismo cultivo con mediciones en el mismo período del año.

⁹ Sistema de labranza, zona de estudio, tipo de cultivo, condiciones de regadío, etc.

CONCLUSIONES

El flujo de CO₂, desde el suelo a la atmósfera, para los dos sistemas de labranza estudiados en cultivo de haba bajo condiciones de secano para el período de septiembre 2008 a enero 2009 fue de 390 g de CO₂ m⁻² en CL y 319 g m⁻² en LT, por lo que se estableció para ese periodo que en CL existió un flujo mayor de CO₂ y se comprobó que existió una diferencia estadística en el flujo entre los dos tratamientos.

En la escala diaria se obtuvo que el flujo de CO₂ suelo-atmósfera, producto de la respiración de seres autótrofos y heterótrofos, se asoció mejor con las variables de Temperatura ambiente, Temperatura de suelo y Evapotranspiración de cultivo, obteniéndose 6 modelos significativos sin restricción de signo de las variables dependientes que cumplieron con las hipótesis de residuales (4 en CL y 2 en LT) con un R² que varió entre 0,79 y 0,99, mientras que en los modelos con restricción de signo se obtuvieron 2 modelos significativos que cumplieron con las hipótesis de residuales (2 en CL y 0 en LT) con un R² que varió entre 0,79 y 0,81.

En la escala estacional del período medido la variable Evapotranspiración de cultivo fue la que describió de mejor forma la RS para cada tratamiento, con un R² de 0,86 para CL y un R² de 0,95 Para LT.

Es necesario precisar sí la correlación de estas variables con la RS resulta positiva para el resto de los meses no abarcados en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E., y E. Martínez. 2006. Movimiento de gases y acumulación de carbono en el suelo. Laboratorio de suelo-agua-planta, Universidad de Chile. Disponible en: [http://www.sap.uchile.cl/descargas/biofisica/044_5.Movimiento de gases y C en el suelo.pdf](http://www.sap.uchile.cl/descargas/biofisica/044_5.Movimiento_de_gases_y_C_en_el_suelo.pdf) Leído el 20 de octubre de 2008.
- Acevedo, E., y P. Silva. 2003. Agronomía de la cero labranza. Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas N° 10. 132 p.
- Baldocchi D., and J. Tang. 2005. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components. University of California, Biogeochemistry 73: 183-207.
- Bouwman, A. F. (1990). Soils and the Greenhouse Effect. John Wiley and Sons, Nueva York.
- CONAMA, 1994. Perfil ambiental de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente. 569 p. Santiago de Chile.
- Evans R.G., J.D. Jabro, U. Sainju, W.B. Stevens. 2008. Carbon dioxide flux as affected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops. Journal of Environmental Management 88 (4): 1478-1484.
- Frank, A. B., M. A. Liebig y D. L. Tanaka. 2006. Management effects on soil CO₂ efflux in northern semiarid grassland and cropland. Soil & Tillage Research 89: 78-85.
- García, C., F. Gil, T. Hernández, C. Trasar. 2003. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Mundi-Prensa. 371 p.
- Jassal, R., T. Black, T. Cai, K. Morgenstern, Z. Li, D. Gaumont-Guay, 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.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma 123: 1-22.
- LI-COR Biosciences, 2007. LI-8100 Automated soil CO₂ flux system. Instruction Manual. LI-COR Biosciences. Lincoln, Nebraska, EEUU, 433 p.
- Llambías, M.J. 2010. Respiración del suelo en un matorral de la región bioclimática Mediterránea Desértico-Oceánica de Chile en condición natural y forestado con *Acacia*

saligna. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. 35 p.

Martínez, E., J.P. Fuentes, P. Silva, S. Valle and E. Acevedo. 2008. Soil physical properties and wheat root grow as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research* 99: 232-244 p.

Martínez, E. 2007. Cero Labranza, Carbono y capacidad productiva de un suelo aluvial en la zona central de Chile. Tesis Doctorado en Ciencias Silvoagropecuarias y Veterinarias, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Facultad de Ciencias Forestales y Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias. Santiago, Chile. 149 p.

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.

Morales, E. 2005. Diseño experimental a través del análisis de varianza y modelo de regresión lineal. Consultora Carolina. Valdivia, Chile. 248 p.

Navarro, G. y S. Navarro. 2003. *Química Agrícola*. Mundi-Prensa. España. 491 p.

Perez, P., G. Ouro, A. Merino, F. Macías. 1998. Descomposición de materia orgánica, biomasa microbiana y emisión de CO₂ en un suelo forestal bajo diferentes manejos selvícolas. *Universidad de Santiago de Compostela. Edafología, Volumen 5*: 83-93.

Prado, A. y M. A. Ruiz. 2002. *SPSSII Guía para el análisis de datos*. Mc Graw Hill. España. 715 p.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), 2009. Estadísticas Agrícolas. Disponible en: <http://www.odepa.gob.cl/> Leído el 30 de diciembre de 2010.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2002. Informes sobre recursos mundiales de suelos: Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma, Italia. 83 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), 2006. Evapotranspiración de cultivo, guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm> Leído el 15 de abril de 2009.

Organización de las Naciones Unidas (ONU), 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>. Leído el 23 de febrero de 2010.

Reicosky, D.C. 1997. Tillage-induced CO₂ emission from soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49:273-285.

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.

Swift, R. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science* 166 (11): 858-871.

Tabachnick, B y L. Fidell. 1996. *Using Multivariate Statistics*. HarperCollins College Publisher. New York, EEUU. 880 p.

Trumbore, S. 2006. Carbon respired by terrestrial ecosystems – recent progress and challenges. *Global Change Biology* 12 (2): 141-153.

United States Department of Agriculture (USDA). 1999. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Second Edition. Agriculture Handbook Number. 436 p.*

United States Department of Agriculture (USDA). 2003. *Keys to Soil Taxonomy. Ninth edition.*

Universidad de la República, Uruguay (UdelaR), departamento de edafología. s/a. *Atmósfera del suelo, fase gaseosa. Disponible en: <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Atmosfera%20del%20suelo.pdf>* Leído el 5 de mayo de 2010.

Vivanco, M. 1999. *Análisis estadístico multivariable: teoría y práctica. Universitaria. Santiago, Chile, 234 p.*

ANEXOS

ANEXO 1. Procedimiento de cálculo de la evapotranspiración horaria, adaptación de texto publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO, 2006).

Cálculo de Evapotranspiración de referencia (ET_o) para períodos horarios

Para el cálculo de la ET_c es necesario en primera instancia calcular la ET_o , la cual corresponde a la evapotranspiración que tuvo un cultivo de pasto con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23.

La ecuación FAO Penman-Monteith para cálculos horarios es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{37}{T_{hr} + 273} * u_2 * (e^o(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 u_2)}$$

Ecuación 4.

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia [mm hora^{-1}].

R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$].

G : Flujo del calor de suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$].

T : Temperatura media del aire a 2 m de altura [$^{\circ}\text{C}$].

u_2 : Velocidad del viento a 2 m de altura [m s^{-1}].

$e^o(T_{hr})$: Presión de vapor de saturación [kPa].

e_a : Presión real de vapor [kPa].

$(e_s - e_a)$: Déficit de presión de vapor [kPa].

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

γ : Constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

El procesamiento y la metodología de cálculo de los datos requeridos para el cálculo de la ET_o se presentan a continuación.

Constante Psicrométrica (γ)

La constante psicrométrica, γ , se calcula por:

$$\gamma = \frac{c_p * P}{\varepsilon \lambda}$$

Ecuación 5.

Donde:

γ : Constante psicrométrica kPa [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].

P: Presión atmosférica [kPa].

λ : Calor latente de vaporización, 2,45 [MJ kg^{-1}].

c_p : Calor específico a presión constante, $1,013 \times 10^{-3}$ [MJ $\text{kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$].

ε : Cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622.

Presión atmosférica (P). La presión atmosférica, P, es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. La evaporación en altitudes elevadas ocurre en parte gracias a la baja presión atmosférica que se expresa con la constante psicrométrica. Este efecto es, sin embargo, pequeño y en los procedimientos del cálculo, el valor medio para una localidad es suficiente. Para calcular P puede emplearse una simplificación de la ley de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de 20°C :

$$P = 101,3 * \left(\frac{293 - 0,065 * z}{293} \right)^{5,26}$$

Ecuación 6.

Donde:

P: Presión atmosférica [kPa].

z: Elevación sobre el nivel del mar [m].

Calor latente de vaporización (λ). El calor latente de vaporización, λ , expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua bajo presión y temperatura constantes. El valor del calor latente de vaporización varía en función de la temperatura. Cuanto más elevada sea la temperatura, menos energía será requerida. Como λ varía levemente dentro de rangos de temperaturas normales, se considera un valor constante de $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$. Este valor corresponde al calor latente de vaporización a una temperatura del aire de alrededor de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Presión de saturación de vapor a temperatura del aire $e^\circ(T_{hr})$

La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como:

$$e^\circ(T_{hr}) = 0,6108 * \exp\left[\frac{17,27 * T_{hr}}{T_{hr} + 237,3}\right]$$

Ecuación 7.

Donde:

$e^\circ(T_{hr})$: Presión de saturación de vapor a la temperatura horaria promedio del aire [kPa].

T_{hr} : Temperatura promedio horaria del aire [$^\circ\text{C}$].

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ)

Para el cálculo de ET_o , se requiere calcular la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura, Δ . La pendiente de la curva a una temperatura dada se da por:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T_{hr}}{T_{hr} + 237,3}\right)\right]}{(T_{hr} + 237,3)^2}$$

Ecuación 8.

Donde:

Δ : Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura del aire [kPa °C⁻¹].

T_{hr} : Temperatura promedio horaria del aire [°C].

Presión real de vapor (e_a) derivada de la Humedad relativa media

$$e_a = \frac{HR_{media}}{100} * e^{\Delta(T_{media})}$$

Ecuación 9.

Donde:

HR_{media} es la humedad relativa media, definida como el promedio entre la HR_{max} y HR_{min} para el periodo horario.

Radiación neta (R_n)

La radiación neta, R_n , es la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas. Es el equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre o la diferencia de la radiación de onda corta entrante neta (R_{ns}) y la radiación de onda larga saliente neta (R_{nl}). La R_n es normalmente positiva durante el día y negativa durante la noche. El valor diario total para R_n es casi siempre positivo para 24 horas, excepto en condiciones extremas de latitudes elevadas.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Ecuación 10.

Albedo (α) y radiación neta solar (R_{ns}). Una cantidad considerable de la radiación solar que llega a la superficie terrestre se refleja en ella. La fracción, α , de la radiación solar que es reflejada por la superficie se conoce como albedo. El albedo es muy variable de acuerdo al tipo de superficie y el ángulo de incidencia o la pendiente de la superficie terrestre. Su valor puede ser tan elevado como 0,95 para la nieve recientemente caída y tan bajo como 0,05 para un suelo desnudo y húmedo. Una cubierta verde de vegetación tiene un albedo de entre 0,20 a 0,25. Para el cultivo de referencia, se asume que α tiene un valor de 0,23. La radiación neta solar, R_{ns} , es la fracción de la radiación solar R_s que no se refleja en la superficie.

La radiación neta de onda corta resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada está dada por:

$$R_{ns} = (1-\alpha) * R_s$$

Ecuación 11.

Donde:

R_{ns} : Radiación neta solar o de onda corta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$].

α : Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23 para el cultivo hipotético de referencia [adimensional].

R_s : Radiación solar entrante [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$].

Radiación solar o de onda corta (R_s). Cuando la radiación atraviesa la atmósfera para llegar a la superficie terrestre, parte de ella se dispersa, refleja o absorbe por los gases, las nubes y el polvo atmosférico. La cantidad de radiación que llega a un plano horizontal en la superficie terrestre se conoce como radiación solar, R_s . Como el sol emite energía por medio de ondas electromagnéticas caracterizadas por longitudes de onda cortas, la radiación solar también se conoce como radiación de onda corta. En un día despejado, R_s constituye aproximadamente el 75% de la radiación extraterrestre. En un día nublado este valor disminuye debido a que la radiación se dispersa en la atmósfera. Sin embargo incluso con una nubosidad muy densa, cerca del 25% de la radiación extraterrestre puede todavía llegar a la superficie terrestre principalmente como radiación difusa de la atmósfera. La radiación solar también se conoce como radiación global, que es la suma de radiación directa de la onda corta del sol y de la radiación difusa resultante de todos los otros ángulos. La radiación solar es un dato medido por la estación agrometeorológica la Platina.

Radiación neta de onda larga (R_{nl}). La radiación solar absorbida por la tierra se convierte en energía térmica. La tierra pierde esta energía por medio de varios procesos, entre los cuales se encuentra la emisión de radiación. La tierra, que tiene una temperatura mucho más baja que el sol, emite energía radiante con longitudes de onda más largas que el sol. Por ello, la radiación terrestre se conoce como radiación de onda larga. La radiación de onda larga emitida por el planeta es absorbida por la atmósfera o perdida hacia el espacio. La radiación de onda larga recibida por la atmósfera aumenta su temperatura. Por consiguiente, la atmósfera irradia también energía. Parte de la radiación emitida por la atmósfera se dirige nuevamente hacia la superficie terrestre. Por lo tanto, la superficie terrestre emite y recibe radiación de onda larga. La diferencia entre la radiación de onda larga entrante y saliente se llama radiación neta de onda larga, R_{nl} . Como la radiación

saliente de onda larga es casi siempre mayor que la radiación entrante, R_{nl} representa una pérdida de energía.

La cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia. Esta relación se expresa cuantitativamente por la ley de Stefan-Boltzmann. Se debe tener en cuenta que el flujo de energía neta que sale de la superficie terrestre es menor que la calculada y dada por la ley de Stefan-Boltzmann debido a la absorción y radiación devuelta del cielo. El vapor de agua, las nubes, el CO_2 y el polvo absorben y emiten radiación de onda larga. Por ello se deben conocer sus concentraciones para determinar el flujo saliente neto. Como la humedad y la nubosidad tienen un papel importante, la ley de Stefan-Boltzmann se corrige por estos dos factores cuando se estima el flujo saliente neto de la radiación de onda larga. De tal modo que se asume que las concentraciones de los otros factores de absorción de radiación son constantes:

$$R_{nl} = \sigma * T_{hr,k}^4 * (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) * \left(1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35\right)$$

Ecuación 12.

Donde:

R_{nl} : Radiación neta de onda larga [$MJ m^{-2} hora^{-1}$].

σ : constante de Stefan-Boltzmann [$2,043 \times 10^{-10} MJ K^{-4} m^{-2} hora^{-1}$].

$T_{hr,K}$: Temperatura absoluta horaria [$K = ^\circ C + 273,16$].

e_a : Presión de vapor real [kPa]. Ecuación 9.

R_s/R_{so} : Radiación relativa de onda corta [valores $\leq 1,0$].

R_s : Radiación solar medida o calculada [$MJ m^{-2} hora^{-1}$].

R_{so} : Radiación en un día despejado [$MJ m^{-2} hora^{-1}$].

Puesto que el cociente R_s/R_{so} se utiliza para representar la cobertura de nubes cuando se calcula R_{nl} para períodos horarios durante la noche, el cociente R_s/R_{so} se puede fijar igual a R_s/R_{so} calculado para un período que ocurre 2-3 horas antes de la puesta del sol, antes de que el ángulo del sol llegue a ser pequeño. Esto servirá generalmente como buena aproximación de la nubosidad que ocurre durante la noche subsecuente. El período horario de 2 a 3 horas antes de la puesta del sol se puede identificar durante el cómputo del R_a como el período durante el cual ω , está dentro del rango $(\omega_s - 0,79) \leq \omega \leq (\omega_s - 0,52)$, donde ω_s se calcula usando la Ecuación 13. Como alternativa más aproximada, uno puede

asumir $R_s/R_{s0} = 0,7$ a $0,8$ en climas áridos y semiáridos. Un valor de $R_s/R_{s0} = 0,3$ asume la cobertura total del cielo por las nubes.

Ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol. El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol, ω_s , se da por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) * \tan(\delta)]$$

Ecuación 13.

Donde:

φ : Latitud [rad].

δ : Declinación solar.

La conversión de grados decimales a radianes se da por:

$$[radianes] = \frac{\pi}{180} [grados decimales]$$

Ecuación 14.

La declinación solar, δ , está dada por:

$$\delta = 0,409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right)$$

Ecuación 15.

Donde J es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

Radiación relativa de onda corta (R_s/R_{s0}). La radiación relativa de onda corta es el cociente de la radiación solar (R_s) y de la radiación solar de un día despejado (R_{s0}). R_s es la radiación solar que realmente llega a la superficie terrestre en un determinado período, mientras que R_{s0} es la radiación solar que alcanzaría la misma superficie durante el mismo período si el cielo estuviera despejado. La radiación relativa de onda corta es una manera de expresar la nubosidad de la atmósfera; cuanto más nublado este el cielo, más pequeño será su valor. El cociente varía aproximadamente entre 0,33 (nubosidad elevada) y 1 (cielo despejado).

Radiación solar en un día despejado (R_{so}). La radiación en días despejados, R_{so} , puede ser calculada de la siguiente forma:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} * z) * R_a$$

Ecuación 16.

Donde:

z: Elevación de la estación sobre el nivel del mar [m].

R_a : Radiación extraterrestre.

Radiación extraterrestre para periodos horarios o menores (R_a). Para períodos horarios o menores, el ángulo solar al principio y al final del período deben ser considerados al calcular R_a :

$$R_a = \frac{12 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\text{sen}(\omega_2) - \text{sen}(\omega_1))]$$

Ecuación 17.

Donde:

R_a : Radiación extraterrestre por hora [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$].

G_{sc} : Constante solar = $0,082 \text{ [MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}]$.

d_r : Distancia relativa inversa Tierra-Sol.

Δ : Declinación solar [rad].

φ : Latitud [rad].

ω_1 : Angulo de radiación al inicio del período [rad].

ω_2 : Angulo de radiación al final del período [rad].

Los ángulos de radiación solar al inicio y al final del período están dados por:

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi * t_1}{24}$$

Ecuación 18.

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi * t_1}{24}$$

Ecuación 19.

Donde

ω : ángulo solar en el momento en que ocurre el punto medio del periodo considerado [rad].

t_1 : duración del periodo considerado [horas] por ejemplo, 1 para periodos horarios y 0,5 para periodos de 30 minutos.

El ángulo solar en el momento en que ocurre el punto medio del periodo considerado se calcula por:

$$\omega = \frac{\pi}{12} * [(t + 0,06667 * (L_z - L_m) + S_c) - 12]$$

Ecuación 20.

Donde:

t : hora estándar en el punto medio del período considerado [hora], p.e. para un período entre las 14:00 y las 15:00 horas, $t = 14,5$.

L_z : longitud del centro de la zona de tiempo local [grados oeste de Greenwich] $L_z = 45^\circ$ para Santiago, Chile época de verano.

L_m : longitud de la zona de medición [grados oeste de Greenwich].

S_c : corrección estacional para el tiempo solar [horas].

$\omega < -\omega_s$ o $\omega > \omega_s$ indica que el sol está bajo del horizonte de manera que, por definición, R_a es cero.

La corrección estacional para el tiempo solar.

$$S_c = 0,1645 * \text{sen}(2b) - 0,1255 * \cos(b) - 0,025 * \text{sen}(b)$$

Ecuación 21.

Con,

$$b = \frac{2 * \pi * (J - 81)}{364}$$

Ecuación 22.

Donde J es el número de día en el año.

Flujo de calor del suelo

El flujo del calor del suelo, G, es la energía que se utiliza para calentar el suelo. G tiene valores positivos cuando el suelo se calienta y negativos cuando el suelo se enfría. Aunque el flujo calórico del suelo es pequeño comparado con R_n y puede ser no considerado con frecuencia, la cantidad de energía ganada o perdida por el suelo en este proceso teóricamente debe restarse o agregarse a R_n para estimar la evapotranspiración.

Para los cálculos horarios el valor de G se puede aproximar durante períodos de luz por:

$$G_{hr} = 0,1 * R_n$$

Ecuación 23.

y durante los periodos nocturnos:

$$G_{hr} = 0,5 * R_n$$

Ecuación 24.

Cálculo de la Evapotranspiración de cultivo (ET_c)

La ET_c se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o , y el coeficiente del cultivo K_c , el cual representa las diferencias de las características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica con respecto al cultivo de referencia (pasto).

$$ET_c = K_c * ET_o$$

Ecuación 25.

Donde:

ET_c : evapotranspiración del cultivo [mm h^{-1}].

K_c : coeficiente del cultivo [adimensional].

ET_o : evapotranspiración del cultivo de referencia [mm h^{-1}].

El coeficiente del cultivo varía en el transcurso de las etapas de desarrollo del cultivo.

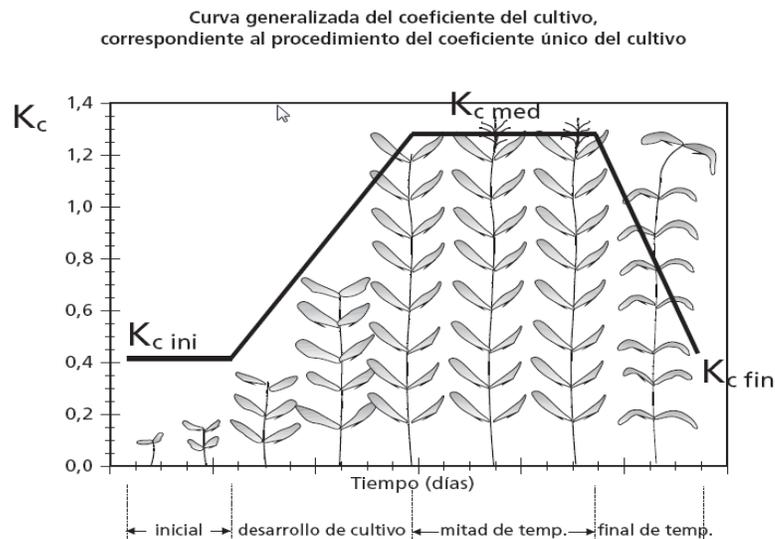


Figura 8. Curva generalizada del coeficiente de cultivo.

Las mediciones efectuadas para este estudio comprendieron únicamente las etapas de desarrollo de mediados y fin de temporada.

Etapa de mediados de temporada

La etapa de mediados de temporada comprende el periodo de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la ET_o de referencia. Durante la etapa de mediados de temporada, el coeficiente K_c alcanza su valor máximo.

Etapas de finales de temporada

La etapa final o tardía de crecimiento comprende el periodo entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de K_c y ET_c finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas. El valor de K_c al finalizar la etapa final ($K_{c\text{ fin}}$) refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de $K_{c\text{ fin}}$ será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de $K_{c\text{ fin}}$ será bajo.

Coefficiente de cultivo típico para habas propuesto por FAO

Los coeficientes de cultivo para habas propuestos por FAO son los siguientes:

$K_{c\text{ med}}$: 1,15.

$K_{c\text{ fin}}$ seco: 0,3.

Los valores de $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$, propuestos por FAO son representativos de climas subhúmedos con una humedad relativa mínima promedio (HR_{min}) de alrededor de 45% y con velocidades de viento suaves a moderadas, promediando 2 m s^{-1} . Para condiciones más áridas (representativo del lugar de estudio), el coeficiente K_c correspondientes a la etapa de mediados de temporada fue modificado como se describe a continuación.

Determinación de $K_{c\text{ med}}$

Para realizar las correcciones específicas para el caso de climas donde el valor de HR_{min} difiera de 45% o donde el valor de u_2 sea mayor o menor a 2 m s^{-1} , los valores de $K_{c\text{ med}}$ deben ser ajustados de acuerdo a la fórmula:

$$K_{c\text{ med}} = K_{c\text{ med(FAO)}} + [0,04 * (u_2 - 2) - 0,004 * (HR_{\text{min}} - 45)] * \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3}$$

Ecuación 26.

Donde:

$K_{c\text{ med(FAO)}}$ valor de $K_{c\text{ med}}$ propuesto por FAO.

u_2 : valor medio diario de la velocidad del viento a 2 m de altura sobre pasto para la etapa de mediados de temporada [m s^{-1}], con $1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ m s}^{-1}$.

HR_{\min} : valor medio diario de humedad relativa mínima durante la etapa de mediados de temporada [%], para $20\% \leq HR_{\min} \leq 80\%$.

h : altura media de las plantas durante la etapa de mediados de temporada para $0,1 \text{ m} \leq h \leq 10 \text{ m}$.

ET_c en las distintas condiciones de manejo

El uso del mantillo sobre la superficie es una práctica que reduce las pérdidas por evaporación en la superficie del suelo, se postula que la cantidad de agua evaporada en el suelo es aproximadamente un 5% inferior por cada 10% de la superficie del suelo que es cubierta efectivamente por la cobertura orgánica. Se procedió, tomando en consideración este supuesto, a disminuir la evaporación registrada en CL en un 30%, tomando como referencia las observaciones y datos tomados en terreno (Cuadro 7).

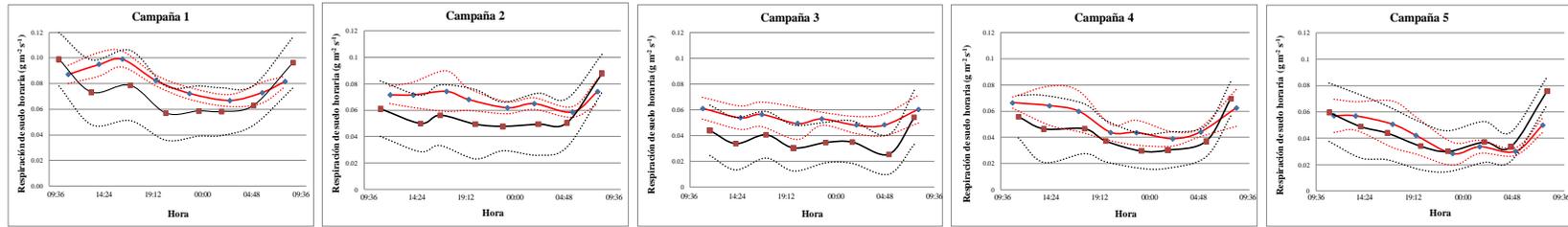
ANEXO 2. Glosario de términos

Cuadro 6. Variables utilizadas en el análisis multivariado.

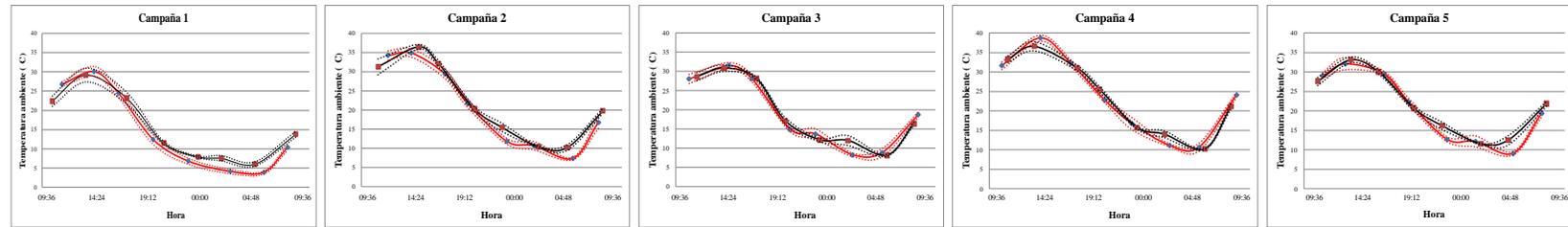
Variable	Unidad de la variable	Descripción de la variable
Flujo exponencial de CO ₂	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Flujo exponencial por m^2 calculado utilizando una curva exponencial corregida de CO ₂ , descrita en el tiempo, en segundos (t).
Flujo lineal de CO ₂	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Flujo lineal por m^2 calculado utilizando una curva lineal corregida de CO ₂ , descrita en el tiempo, en segundos (t).
Humedad relativa promedio	%	Humedad relativa promedio en la cámara de medición.
Carbono en seco promedio	ppm (μmol de CO ₂ en mol de aire)	CO ₂ promedio corregido para el vapor de agua diluido.
H ₂ O promedio	ppm (μmol de agua en mol de aire)	Concentración promedio de vapor de agua en la cámara de medición.
Presión atmosférica promedio	Kpa	Presión atmosférica promedio medida en el sensor óptico.
Temperatura ambiente promedio	°C	Temperatura ambiente promedio en la cámara de medición.
Temperatura de suelo promedio	°C	Temperatura promedio de suelo medida a 20 cm. de distancia del anillo y a 5 cm. de profundidad.

APÉNDICE 1. Gráficos de comportamiento diario de las variables medidas y/o calculadas por condición de labranza.

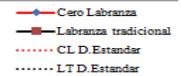
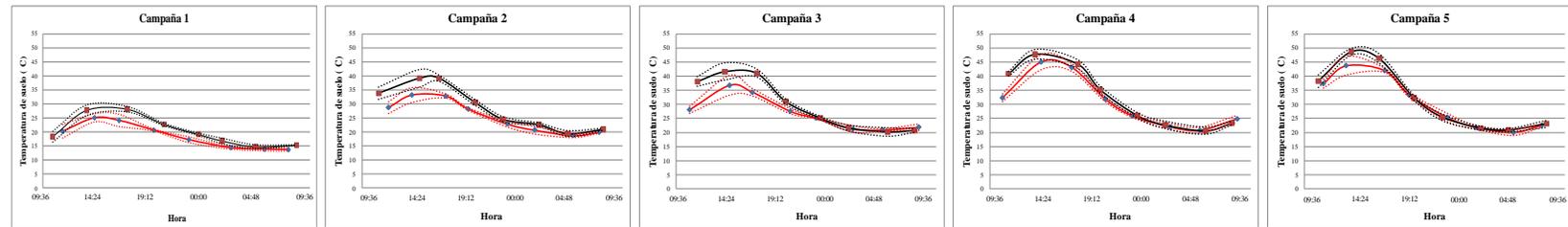
Respiración de suelo:



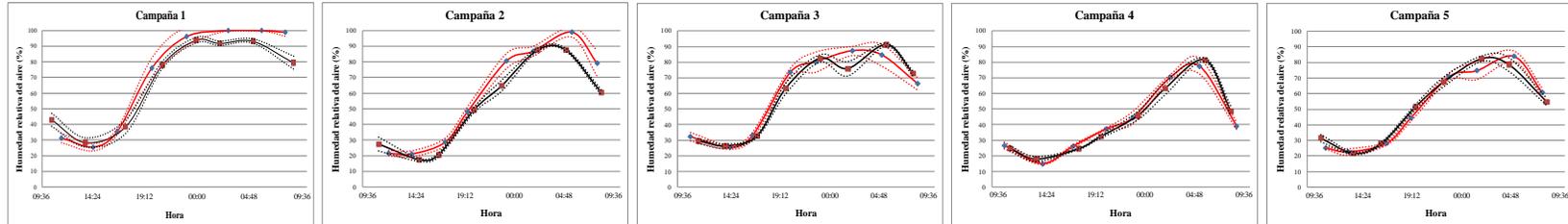
Temperatura Ambiente:



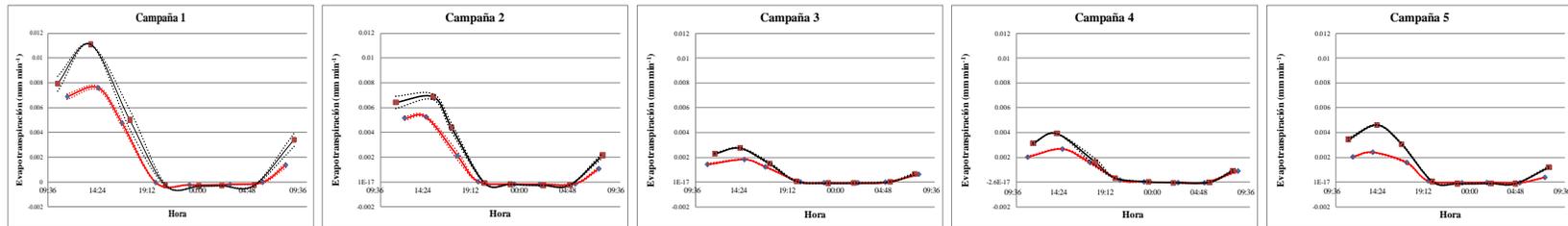
Temperatura de suelo:



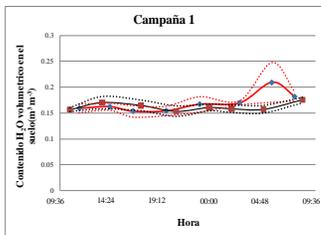
Humedad Relativa:



Evapotranspiración de cultivo:



Contenido de H₂O volumétrico del suelo:



- ◆— Cero Labranza
- Labranza tradicional
- ...○... CL D. Estandar
- ...■... LTD Estandar

APÉNDICE 2. Muestras de rastrojo.

Cuadro 7. Muestras de rastrojo por sistema de labranza, en un área de 25x25 cm.

Muestras de rastrojo (gr), 14 Octubre 2008			Muestras de rastrojo (gr), 30 Enero 2008		
Muestra	Labranza tradicional	Cero labranza	Muestra	Labranza tradicional	Cero labranza
1	7,6	53	1	9,63	65,9
2	16,9	45	2	9,69	70,82
3	7,4	33	3	12,92	20,7
4	20,5	44,6	4	6,41	39,17
5	4,9	23,7	5	15,11	29,69
Promedio	11,46	39,86	Promedio	10,752	45,256

Estos datos fueron utilizados para establecer la ET_c para las dos condiciones de manejo.

