



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**DETERMINACIÓN DEL BALANCE ANUAL DE CARBONO EN UVA
DE MESA CV. THOMPSON SEEDLESS, UTILIZANDO EL MÉTODO
DE “EDDY COVARIANCE”**

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA AGRÓNOMA Y AL
GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS AGROPECUARIAS CON MENCIÓN EN
PRODUCCIÓN FRUTÍCOLA

MARÍA EDITH JIMÉNEZ GÓMEZ

DIRECTORES DE TESIS

VÍCTOR GARCÍA DE CORTÁZAR GARCÍA DE CORTÁZAR
GABRIEL SELLES VAN SCHOUWEN

PROFESORES CONSEJEROS

NICOLÁS FRANK BERGER
JORGE PEREZ QUEZADA

SANTIAGO DE CHILE
2013

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**DETERMINACIÓN DEL BALANCE ANUAL DE CARBONO EN UVA DE MESA
CV. THOMPSON SEEDLESS, UTILIZANDO EL MÉTODO DE “EDDY
COVARIANCE”**

Tesis presentada para optar al Título Profesional de Ingeniera Agrónoma y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias, Mención Producción Frutícola

MARÍA EDITH JIMÉNEZ GÓMEZ

	Calificaciones (Memoria de Título)	Calificaciones (Tesis de Grado)
Directores de Tesis		
Víctor García de Cortázar García de Cortázar Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0	A
Gabriel Selles Van Schouwen Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,8	A
Profesores Evaluadores		
Nicolás Frank Berger Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,0	A
Jorge Pérez Quezada Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,0	A

Santiago, Chile
2013

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias a un gran esfuerzo grupal, en donde agradezco, enormemente, la participación de mis profesores guías, Víctor García de Cortázar y Gabriel Sellés, el apoyo en terreno de Cristina Aspillaga y Carlos Zuñiga, y la motivación y sustento permanente de Pablo Díaz, mi compañero de tesis y pareja. Por último y no menos importante, agradezco los aportes y acotaciones de mis dos profesores colaboradores, Nicolás Franck y Jorge Pérez.

También quiero aprovechar esta instancia para agradecer el apoyo incondicional de mis amigos y familia en esta travesía por la Universidad.

ÍNDICE

RESUMEN	1
PALABRAS CLAVE	1
ABSTRACT	2
KEY WORDS	2
INTRODUCCIÓN	3
Hipótesis de trabajo	5
Objetivo	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Lugar del ensayo	6
Torre instrumental	7
Procesamiento de los datos	9
Evaluación de la metodología “Eddy Covariance”	10
Balance de energía	10
Índice de área foliar y fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada	10
Acumulación de biomasa	11
Materia seca de brotes y racimos	11
Peso de poda	11
Estimación del balance anual de carbono del ecosistema	12
Rendimiento	12
Control del estado hídrico del suelo	12
Análisis estadístico	13
RESULTADOS	14
Balance de energía	14
Temperatura del aire y suelo	18
Características de turbulencia	20
Velocidad y dirección del viento	20
Velocidad de fricción del viento (μ^*)	20
Rellenado de la serie de tiempo de CO ₂	24
Longitud de “fetch”	25
Variación del contenido de agua en el suelo	25
Evolución del índice del área foliar y de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada	28
Balance de carbono	29
Estimación de biomasa acumulada en la temporada y contenido de carbono	33

DISCUSIÓN	37
CONCLUSIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47

RESUMEN

La cuantificación de la huella de carbono en la agricultura cada día toma más fuerza dada las nuevas políticas de mercado, definiendo la competitividad del productor en el rubro. Dentro de las producciones agrícolas de Chile, la uva de mesa es una de las más representativas. Por esta razón, se planteó como objetivo determinar el balance de carbono en uva de mesa cv. Thompson Seedless, conducida bajo parrón español, ubicado en la comuna de Calle Larga, valle de Aconcagua, Chile, utilizando el método “Eddy covariance” (EC).

Las mediciones se realizaron desde enero hasta mayo de 2012 ya que hubo problemas instrumentales al inicio de la temporada. Se instaló una torre con los instrumentos requeridos para medir los flujos de carbono, flujos de energía y otras variables ambientales. Los valores negativos en los flujos de CO₂ se consideraron pérdidas hacia la atmósfera, principalmente por respiración ecosistémica, y los valores positivos, ganancias por fotosíntesis del cultivo. En paralelo, se realizaron mediciones biométricas, tomando muestras de brotes y racimos, índice de área foliar, radiación interceptada y balance de energía durante toda la temporada para validar los flujos de CO₂ medidos con la metodología EC.

El balance de energía, bajo las condiciones de máxima interceptación de radiación solar por el dosel y con alta turbulencia en el sitio, validó las mediciones hechas por EC. No hubo gran variación de los flujos nocturnos de CO₂, alcanzando valores alrededor de $-3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Los mayores valores de los flujos de entrada se observaron cercanos al medio día, en torno a $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante enero y febrero. En los meses siguientes, se redujo la entrada de carbono por la disminución de radiación incidente sobre cultivo y del área foliar fotosintéticamente activa. Desde abril en adelante, la respiración ecosistémica predominó. Desde enero hasta mayo, se estimó que el cultivo acumuló $3,9 \text{ ton C ha}^{-1}$, resultando ser este sistema un sumidero de carbono durante el periodo de evaluación. Se observaron grandes diferencias entre las tasas diarias de acumulación de carbono estimadas por biometría y por el sistema EC, explicadas por el desfase entre los flujos de entrada de CO₂ por fotosíntesis y los incrementos en la biomasa aérea medida, sin embargo, al comparar el carbono total acumulado, la diferencia fue mínima. Para obtener mejores resultados en la comparación de ambos métodos, se sugiere realizar un estudio a largo plazo para verificar el carbono acumulado final, considerando todos los componentes de la planta y además, implementar un sistema para cuantificar respiración por heterótrofos.

PALABRAS CLAVE

- Flujos de carbono
- Micrometeorología
- Agroecosistema

ABSTRACT

The objective of this research was to study the dynamics of CO₂ exchange and determine the carbon balance at the end of the production season of a table grape vine cv. Thompson Seedless, located in 'Calle Larga', Aconcagua Valley, Chile, using the Eddy Covariance methodology (EC).

Measurements were made from January to May 2012 because there were instrumental problems at the beginning of season. Carbon fluxes, energy flows and other environmental variables were measured. Negative values in CO₂ fluxes were considered as lost to the atmosphere primarily by ecosystem respiration and positive values, gains through photosynthesis. At the same time, biometric measurements were made, taking samples from shoots and clusters, leaf area index, intercepted radiation and energy balance throughout the season to validate the EC methodology.

Throughout the measurement period there was no significant variation of CO₂ flows at night, reaching values around -3 mol m⁻²s⁻¹. During the day, the highest values were observed at noon, close to 25 mol m⁻²s⁻¹, during January and February, dropping in the following months due to reduced incident radiation and senescence of active leaf area. From April onwards, the outflow dominated. From January to May the Carbon accumulation was 3,9 ton C ha⁻¹. There were large differences between the daily rates of carbon accumulation estimated by biometrics and the EC system, given the time lag between the inflow of CO₂ by photosynthesis and the increment of aerial biomass measured, however, when the accumulated total carbon was compared, the difference was minimal. For best results in the comparison of the two methods, it is suggested to make a long-term study to verify the accumulated total carbon, considering all the components of the plant and also implement a system for measuring respiration by heterotrophs.

KEY WORDS

- Carbon flux
- Micrometeorology
- Agroecosystem

INTRODUCCIÓN

Entre los principales productos agrícolas de exportación de Chile se encuentran el vino, uva de mesa, palta, semilla de trigo, ciruelas, manzanas, entre otros (Rojas *et al.*, 2010). Por otra parte, el 22% del total de productos exportados en el año 2009 (agropecuarios y maderas) tiene como destino países que se encuentran trabajando con el cálculo de la huella de carbono (Romero, 2010), factor a considerar en el momento de escoger un mercado particular.

La huella de carbono calcula todas las emisiones de gases de efecto invernadero de los que un producto, servicio o empresa son responsables a lo largo de su cadena de valor/abastecimiento, permitiendo encontrar eficiencias internas y externas que contribuyan a disminuir emisiones y mejorar procesos (PROCHILE, s.a.). Estudios en Chile sobre la huella del carbono en la agricultura son escasos, sin embargo, esta situación está cambiando debido al interés en el tema.

En la actualidad, la producción de uva de mesa ocupa un lugar importante en fruticultura de Chile, en donde la superficie con parronales continúa liderando a las especies frutícolas plantadas a nivel nacional, cubriendo cerca de un quinto de la superficie frutícola nacional (Bravo, 2010). En el año 2010, representó aproximadamente el 32% del volumen exportado de frutas (Bravo, 2011). Por esta razón, conocer la cantidad de carbono fijada por este cultivo resultaría en una valiosa información a considerar para un estudio de huella de carbono, aumentando la competitividad del rubro.

Para cuantificar el carbono absorbido es de utilidad plantearse el problema en forma sistémica, es decir, estableciendo los límites del sistema a evaluar, los componentes que actúan como fuentes y/o sumideros de carbono y, por último, conociendo los factores y condiciones que afectan las tasas de entrada y/o salida de carbono hacia estos componentes. Así, el balance de los flujos de carbono en un agroecosistema se puede resumir como la suma de las entradas de éste al sistema, mediante fotosíntesis y las salidas, a través de la respiración (autótrofa y heterótrofa), cosecha de biomasa (frutos) y otros flujos no respiratorios (ejemplo, uso de combustibles).

El CO₂ secuestrado por las plantas es el resultado de las diferencias entre el CO₂ atmosférico absorbido y el CO₂ emitido por respiración autótrofa. La diferencia es convertida en biomasa. El contenido de carbono en ésta suele oscilar entre el 45-50 % del peso seco de la planta (FAO, 2002). En la vid, la cantidad de materia seca de los racimos corresponde aproximadamente el 45-50% de la materia seca de la planta (Mota *et al.*, 2010; Williams, 1996). Por otra parte, según Mota *et al.* (2010) el contenido de carbono (en base al peso seco) de los racimos de la vid corresponden al 45-50% aproximadamente.

Existen distintas formas de cuantificar los flujos de carbono dependiendo de la escala de análisis utilizada, definiéndose el área de observación, el tiempo en que se llevan a cabo las

mediciones y la continuidad de los datos obtenidos (Baldocchi, 2003). Entre los nuevos métodos micrometeorológicos, la técnica de “eddy covariance” se está consolidando como la principal, gracias al continuo apoyo mostrado por la comunidad científica mundial.

El método de “eddy covariance”, también conocido como técnica de las fluctuaciones, correlación del torbellino o “eddy correlation”, se caracteriza por captar los movimientos turbulentos de masas o paquetes de aire (“eddies”) transportados verticalmente hacia arriba o hacia abajo, conteniendo gases como el dióxido de carbono y vapor de agua (Baldocchi, 2003). El flujo vertical de una entidad transportada en un determinado punto se puede representar como la covarianza de la velocidad vertical del viento y la concentración de la entidad en interés (Burba and Anderson, 2010), como se observa en la siguiente ecuación,

$$F \approx \overline{\rho_a \omega' c'} \quad (1)$$

Donde F es el flujo de una entidad, c es la relación entre la densidad de la entidad de interés con la densidad del aire ($c = \rho_c / \rho_a$), ρ_a es la densidad del aire y ω es la velocidad vertical del viento. La barra superior representa el valor medio en el tiempo y las primas, la desviación instantánea con respecto a la media.

Uno de los aspectos problemáticos de la metodología “eddy covariance” es que depende de ciertas condiciones teóricas difíciles de cumplir en terrenos complejos, reduciendo la calidad de las mediciones. Las más importantes son la estacionariedad de los datos medidos, adecuadas condiciones turbulentas, media de la velocidad vertical del viento igual a cero y no advección horizontal durante un periodo de medición (Foken and Wichura, 1996). La calidad de los datos medidos a través de esta técnica no sólo es influenciada por los requerimientos teóricos mencionados anteriormente, sino que también por problemas instrumentales y meteorológicos (Goulden *et al.*, 1996; Foken *et al.*, 2004). Sin embargo, de todas las limitaciones conocidas, la más relevante es que no se cumpla la condición de atmósfera turbulenta, principalmente durante la noche (Foken *et al.*, 2004; Ruppert *et al.*, 2006).

Para enfrentar estos inconvenientes se han planteado ciertos criterios para filtrar aquellos datos que no cumplen con las condiciones mencionadas y una serie de correcciones a éstos para perfeccionar o mejorar la calidad de las mediciones (Falge *et al.*, 2001; Gu *et al.*, 2005; Ruppert *et al.*, 2006).

Otra forma para la validación, en el largo plazo, de la estimación del carbono acumulado en ecosistema mediante la técnica “eddy covariance” es la comparación con las estimaciones de la producción neta del ecosistema (PNE) (Barford *et al.*, 2001; Curtis *et al.*, 2002; Gough *et al.*, 2008). Estas se realizan asumiendo que los flujos que predominan en el ecosistema son la fotosíntesis y la respiración ecosistémica, por lo tanto, el intercambio neto del ecosistema (INE) medido por “eddy covariance” es cercano a la estimación de PNE (Chapin III *et al.*, 2006).

Como se mencionó en el inicio, es importante conocer tanto el poder sumidero de carbono del cultivo como el aporte de las otras etapas del proceso de producción de uva en la emisión de gases invernadero. En la presente investigación, sólo se estudiará el balance de carbono a nivel de suelo-cultivo-atmósfera, a través de “eddy covariance”, siendo fundamental que en futuros trabajos científicos se complete la cadena productiva.

Hipótesis de trabajo

El carbono fijado en el ecosistema durante una temporada de crecimiento corresponde aproximadamente al doble del contenido de carbono en el fruto.

Objetivo

Determinar el balance anual de carbono en un parral de uva de mesa variedad ‘Thompson Seedless’, ubicado la comuna de Calle Larga, región de Valparaíso, utilizando el método “Eddy covariance”.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del ensayo

El ensayo se llevó a cabo en una plantación comercial de uva de mesa (*Vitis vinífera* L.) cv. Thompson Seedless, del predio El Guindal, perteneciente a Agrícola Brown Ltda., ubicado en la comuna de Calle Larga, región de Valparaíso, Chile ($32^{\circ} 52' 40''$ S, $70^{\circ} 37' 45''$ O, 795 m.s.n.m.).



Figura 1. Foto satelital de la ubicación de la estación “Eddy covariance” (EC) en el predio El Guindal. Las coordenadas UTM son: 19H 0347503, 6361103.

Para llevar a cabo las mediciones se eligió un parronal homogéneo de Thompson Seedless de 7,04 ha de superficie, rodeado de uva de mesa de diferentes variedades, cultivada bajo el mismo sistema de conducción, dada las condiciones de borde requeridas para el uso del sistema “eddy covariance”, conocido como el “fetch” necesario para el cálculo del flujo turbulento. Ya que las mediciones se realizaron a 2 m sobre el dosel, se requirieron 200 m de fetch (relación “altura de medición: fetch” es 1:100) para evitar los efectos advectivos.

Esta variedad, injertada sobre patrón Harmony, tenía once años de edad, con sistema de conducción de parrón español, distanciadas 3,5 x 1,75 m. Poseía un sistema de riego por goteo, con emisores de 4 l h⁻¹ cada 1 m. Dentro de los manejos del huerto se contó con un programa de control de malezas durante la temporada. El rendimiento promedio del huerto es de 3.400 cajas ha⁻¹ exportables (rendimiento aproximado de 32 t ha⁻¹) en la temporada 2010-2011.

Según Valenzuela y Lobato (2000), el clima de la zona es de tipo Mediterráneo subtropical semiárido. Las temperaturas máximas del mes más cálido superan los 32 °C, con una acumulación térmica primavera-verano de 1.400 a 1.500 días-grado (base 10 °C). La precipitación media anual alcanza a 350 mm, concentrándose en los meses de invierno (más del 70% de la precipitación anual ocurre entre mayo y agosto). Existe un periodo seco de 8 meses libres de heladas. La evapotranspiración potencial es de 1.272 mm al año, siendo enero el mes de máxima demanda con 190 mm. La humedad relativa media en verano varía entre 55-65% y en invierno, entre 60-85%. En verano, la nubosidad es relativamente escasa, permitiendo una luminosidad excepcionalmente alta.

El suelo, en el cual se ubicó el ensayo, pertenece a la Serie Pocuro. Es de origen aluvial, profundo, de clase textural franco y franco arcillo arenosa, posee topografía plana y pendiente suave.

Torre instrumental

Para la recolección de datos se usó un sistema instalado en una torre de 2 m de altura sobre el dosel del parrón, teniendo en total una altura de 4 m sobre el nivel del suelo. En la parte superior de la torre, se instalaron los instrumentos señalados en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Componentes de la torre instrumental ubicada sobre el dosel.

Instrumento	Variables medidas	Unidad
Analizador de CO ₂ /H ₂ O de paso abierto (LI 7500A, LI-COR Biosciences. Estados Unidos)	Concentración de dióxido de carbono	μmol CO ₂ mol ⁻¹ aire
	Vapor de agua	mmol H ₂ O mol ⁻¹ aire
Anemómetro sónico (Windmaster Pro, Gill Instrumets. Hampshire, Inglaterra)	Velocidad del viento en tres dimensiones (μ, υ, ω)	m s ⁻¹
Sensor de temperatura y humedad (HMP50, Vaisala INTERCAP®. Vantaa, Finlandia)	Temperatura (T)	°C
	Humedad (HR)	%
Radiómetro neto (NR2, Delta-T Devices. Cambridge, Inglaterra)	Radiación neta (Rn)	W m ⁻²
Piranómetro (SR11, Hukseflux Thermal Sensors. Holanda)	Radiación Global (Rg)	W m ⁻²

Los datos de temperatura del aire (T), humedad relativa (HR), radiación neta (Rn) y radiación global (Rg) se registraron en un datalogger (CR1000, Campbell Scientific Inc. Logan, Estados Unidos) y luego se traspasaron a un computador portátil en formato de

datos comma-separated values (.csv). Por último, fueron procesados mediante Microsoft Excel[®].

Los flujos de gases fueron tomados con una frecuencia de 10 Hz y promediados cada 30 minutos. Los datos de velocidad del viento en tres dimensiones y las concentraciones de gases fueron traspasados a un computador portátil provisto de un software de procesamiento de información, EddyPro versión 2.3.0, que realiza los cálculos de las covarianzas de la componente vertical de la velocidad del viento y de la concentración de CO₂. Así, se estimaron los flujos de dióxido de carbono (CO₂), expresado en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. También se calcularon otros flujos como el de calor latente del aire (LE), en W m^{-2} , de vapor de agua (E), en $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y de calor sensible del aire (H), en W m^{-2} . Los flujos promediados cada media hora fueron corregidos de acuerdo a la literatura (Cuadro 2).

Cuadro 2. Correcciones realizadas por EddyPro 2.3.0 a las variables calculadas por el método “eddy covariance”.

Variable calculada	Corrección propuesta por
Flujo de dióxido de carbono (CO ₂)	Webb <i>et al.</i> (1980)
Flujo de vapor de agua (E)	
Flujo de calor latente (LE)	
Flujo de calor sensible (H)	van Dijk <i>et al.</i> (2004)

Durante las horas de luz, los valores positivos del intercambio neto de CO₂ representaron la ganancia de CO₂ del ecosistema, mientras que los valores negativos, significaron las salidas de CO₂ desde el ecosistema hacia la atmósfera.

Además, el software calculó tres longitudes o “fetch” relacionadas con el área de contribución de los flujos (el “peak” de contribución, 70% y 90% fetch), basado en Kljun *et al.* (2004). De acuerdo al modelo de footprint planteado por Kljun *et al.* (2004), la parametrización es válida bajo las siguientes condiciones: la altura de medición es menor a la altura de la capa límite; la altura de medición es mayor a 1 m; el terreno es homogéneo; el parámetro de estabilidad atmosférica se encuentra en el rango de $-200 < \zeta < 1$; y por último, la velocidad de fricción del viento (μ^*) es mayor a $0,2 \text{ m s}^{-1}$.

También fue posible verificar la calidad de todos los flujos calculados, asignando una etiqueta de calidad, resultado de dos pruebas sobre la estacionariedad de los datos y de condiciones turbulentas aplicados por el software, basado en la literatura (Foken and Wichura, 1996; Foken *et al.*, 2004).

Los datos procesados por EddyPro 2.3.0 se obtuvieron en formato de datos comma-separated values (.csv) que luego fueron transformados a formato Microsoft Excel[®], para su procesamiento posterior.

Para la estimación del flujo de calor del suelo (G), en W m^{-2} , se instalaron dos placas (HFPO1, Hukseflux Thermal Sensors. Holanda) a 7 cm de profundidad, una sobre la hilera a 3,5 m de la planta donde se ubica la torre y la otra, en la entre-hilera próxima a ésta. Además, se colocaron 6 termocuplas de cobre-constantan: tres sobre la hilera y tres en la entre hilera próxima, a 2 cm, 6 cm y 10 cm de profundidad, que midieron la variación de la temperatura del suelo. Los valores de las placas y termocuplas fueron registrados por el mismo datalogger de las variables ambientales.

Procesamiento de los datos

Dado que durante la noche las condiciones atmosféricas pueden ser extremadamente estables o inestables, a diferencia del día, los flujos nocturnos de CO_2 fueron sometidos a un filtro para detectar estos periodos, utilizando el parámetro descrito en la siguiente ecuación.

$$\mu^* = -\sqrt{\overline{\mu' \omega'}} \quad (2)$$

Donde μ^* (m s^{-1}) es la velocidad de fricción del viento, μ y ω (m s^{-1}) son los componentes horizontal y vertical de la velocidad del viento, respectivamente. La barra superior representa el valor medio en el tiempo y las primas, la desviación instantánea con respecto a la media. El filtro consiste en eliminar todos los datos medidos por EC que tengan μ^* fuera del rango establecido. El rango de μ^* se construye clasificando todas las mediciones de los flujos de carbono en pequeños rangos de velocidad fricción del viento; se obtienen las medias y errores estándar de cada grupo; y finalmente, se seleccionan todos los grupos contiguos que posean medias similares sin mayores variaciones (basado en error estándar) entre ellos¹.

En el caso de no existir datos, ya sea por errores en las mediciones o por haber aplicado el filtro μ^* , los espacios tanto en el día como en la noche se rellenaron con valores calculados por interpolación lineal entre los datos adyacentes (Falge *et al.*, 2001) cuando éstos eran pequeños (espacios menores a 4 horas) o por regresión (dependiendo de su significancia). Para realizar las regresiones se consideraron los datos asociados a periodos de alta turbulencia que se encontraban dentro del rango establecido de μ^* durante la noche, y en el día se utilizaron los datos disponibles.

Para realizar las regresiones durante la noche se utilizó el modelo de Van't Hoff (Lloyd y Taylor, 1994 citado por Anthoni *et al.*, 2004), en donde se consideraron los datos de respiración ecosistémica nocturna (RE) bajo turbulencia adecuada (Ecuación 3);

¹Jorge Pérez Quezada, Ingeniero Agrónomo Ph.D., Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, 2011, Chile (Comunicación personal).

$$RE = a * \exp(b * T) \quad (3)$$

Donde a y b son parámetros para ser estimados y T es la temperatura del suelo (a los 10 cm de profundidad). También se probó esta ecuación utilizando la temperatura del aire.

Y en el caso de rellenar espacios mayores a 4 horas durante el día, los datos del flujo de CO_2 se ajustaron a una regresión múltiple considerando radiación global, fracción de radiación interceptada medida con un radiómetro de barra (AccuPAR, Decagon Devices. Estados Unidos), y el tiempo (horas del día). En los periodos de baja cobertura foliar se consideraron las variables de temperatura del aire y del suelo, medidos por el sensor de temperatura de la torre EC y por las termocuplas en el suelo, respectivamente.

Evaluación de la metodología “Eddy covariance”

Debido a variados problemas con la instrumentación de la torre EC, se cambiaron el analizador de gases y el anemómetro sónico al principio de la temporada 2011-2012. Luego de varios ajustes, el sistema fue funcional desde enero de 2012, perdiéndose los datos del periodo de brotación de la vid en esta temporada. Por esta razón, la validación del método se realizó a partir de enero del año 2012.

Se utilizaron tres formas para la evaluar la confiabilidad de los flujos medidos mediante la metodología EC: balance de energía, índice de área foliar y fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada y, acumulación de biomasa.

Balance de energía

Se consideró la siguiente ecuación para validar el método (Aubinet *et al.*, 2000), en donde la radiación neta (R_n), calor sensible (H) y calor latente (LE) se estimaron mediante la torre instrumental.

$$R_n - H - LE - G \approx 0 \quad (4)$$

Índice de área foliar y fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada

El índice de área foliar se estimó para relacionarlo con las variaciones del flujo de CO_2 durante la temporada. Esto se hizo a partir de la radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) medida bajo el parronal (Q_s , en $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), en relación a la radiación recibida sobre la cubierta vegetal (Q_o en $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Las mediciones se realizaron semanalmente con un radiómetro de barra (AccuPAR, Decagon Devices. Estados Unidos) al medio día solar. El índice de área foliar (IAF), se estimó por la ecuación

propuesta por Milthorpe y Moorby (1979), utilizando un valor promedio de coeficiente de extinción de la luz (k) de 0,6 para toda la temporada, obtenido de la medición en distintos periodos del crecimiento de un parronal cv. Thompson Seedless (García de Cortázar *et al.*, 2005). La ecuación utilizada para medir IAF es la siguiente,

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{Q_s}{Q_o}\right)}{-k} \quad (5)$$

Y para obtener la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (f , en %), se utilizó la siguiente ecuación,

$$f = \left[1 - \left(\frac{Q_s}{Q_o}\right)\right] \times 100 \quad (6)$$

Las mediciones de PAR, al igual que de biomasa, se realizaron en seis cuadrantes constituidos por cuatro plantas cada uno. Estos cuadrantes se encontraban dentro del radio de medición de la torre EC.

Acumulación de biomasa aérea

Se esperó que la acumulación de biomasa aérea durante la temporada de crecimiento tuviera una relación positiva con el carbono fijado en el mismo periodo, el cual se obtuvo mediante la integración de los flujos de carbono. Para esta validación se realizó el seguimiento de biomasa aérea en seco.

Materia seca brotes y racimos. Durante la temporada se realizó un seguimiento del crecimiento de los brotes y racimos, en materia seca, tomando una muestra de 1 brote y 1 racimo por planta, provenientes de 3 plantas distintas, ubicadas en un radio de 50 m con respecto a la torre EC, una vez al mes.

De manera de hacer una mejor estimación de materia seca se hizo una relación entre diámetro basal del brote representativo en la planta y la materia seca del brote, medido en cada mes de la temporada de producción, realizando además un seguimiento de diámetro basal de 20 brotes distribuidos en los seis cuadrantes. Por otra parte, se determinó el número de brotes por planta ubicados en los seis mismos cuadrantes, con el fin de estimar la materia seca acumulada en brotes por planta.

Peso de poda. Durante la poda 2012 se evaluó el peso de los restos de poda de las cuatro plantas ubicadas en cada uno de los seis cuadrantes de seguimiento. Después se pesó una

muestra de restos de poda de cada cuadrante para determinar el porcentaje de agua y materia seca. De esta manera se comprobó parte de la acumulación de materia seca en brotes por planta durante el año.

Estimación del balance de carbono del ecosistema

La acumulación del flujo de CO₂ se realizó sumando los valores diarios medidos por EC, considerando un set de datos completo por día después de haber sido corregido.

Para calcular el carbono de los frutos producidos en la temporada se tomaron los datos de rendimiento del cultivo, considerando que el 85% del peso fresco corresponde a agua y que el 50% de la materia seca corresponde a carbono (Mota *et al.*, 2010).

Rendimiento. La producción de fruta se evaluó en las plantas de los seis cuadrantes donde se midió PAR. Se pesaron en fresco 2 racimos por cuadrante y de una muestra al azar se determinó el peso fresco de 100 bayas. Por otra parte, se determinó el número de racimos por planta ubicados en los seis cuadrantes, con el fin de estimar la materia seca acumulada en racimos por planta.

Control del estado hídrico del suelo

Se consideró esta variable con el objetivo de asegurarse que en la temporada de producción no hubo estrés hídrico.

Se monitoreó la variación del contenido de agua en el suelo (H) durante la temporada 2008-2009 y 2009-2010, de forma continua, mediante una sonda de seguimiento continuo del tipo FDR (Agrilink, Aqua Spy. Estados Unidos), ubicada a 7 m de la torre instrumental con sensores ubicados en los 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 cm de profundidad. Los datos fueron entregados cada media hora. Ya que la sonda estuvo operativa hasta fines de la temporada 2010, se solicitaron los datos al huerto sobre la cantidad de agua aplicada por riego en cada temporada de seguimiento para corroborar la información obtenida mediante el sensor.

Durante la temporada 2011-2012 se monitoreó la variación del contenido de agua en el suelo mediante una sonda de seguimiento continuo, modelo ECH2O, del tipo FDR (Decagon Devices, Inc., EUA) hasta los 10 cm de profundidad. Los datos fueron entregados cada media hora. El equipo de monitoreo se ubicó a 7 m de la torre.

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de regresiones. Primero, se verificaron los supuestos sobre los términos de error. Usualmente, se suponen normales con varianzas homogéneas e independientes, comprobándolo mediante la prueba de Anderson-Darling con un nivel de significancia del 5%, y la prueba de Barlett con un nivel de significancia del 5%, respectivamente. Luego, se realizaron pruebas de hipótesis para las regresiones realizadas, probando la significancia de la regresión con F de Snedecor al 5% y los coeficientes de la regresión con T de Student al 5%.

Todos los análisis se realizaron con el software estadístico MINITAB release13.32.

RESULTADOS

Balance de energía

La radiación neta diaria durante los meses de enero y febrero varió entre los 12 y 16 MJ m⁻² día⁻¹. Luego, durante los siguientes meses, disminuyó progresivamente hasta valores de 4 MJ m⁻² día⁻¹, exceptuando algunos días con menores valores atribuidos, principalmente, a la nubosidad.

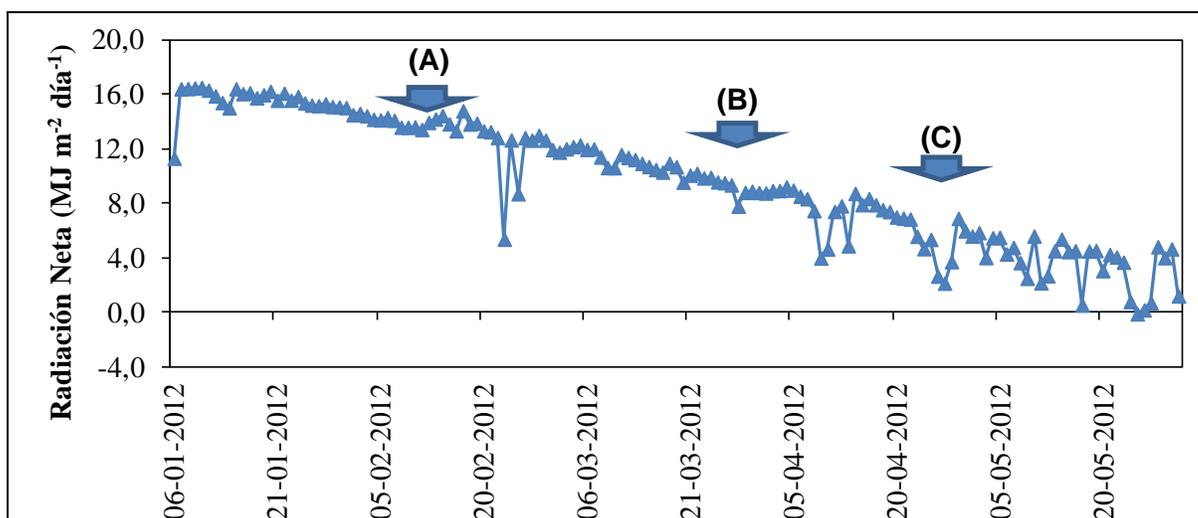


Figura 2. Radiación neta diaria durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo de 2012. (A), periodo de cosecha; (B), comienzo de senescencia de hojas; (C), caída total de hojas.

En la Figura 3, se muestran los flujos diarios de los distintos componentes del balance de energía: radiación neta (Rn), calor sensible del suelo (G), calor sensible del aire (H) y calor latente (LE) de una semana representativa de cada mes.

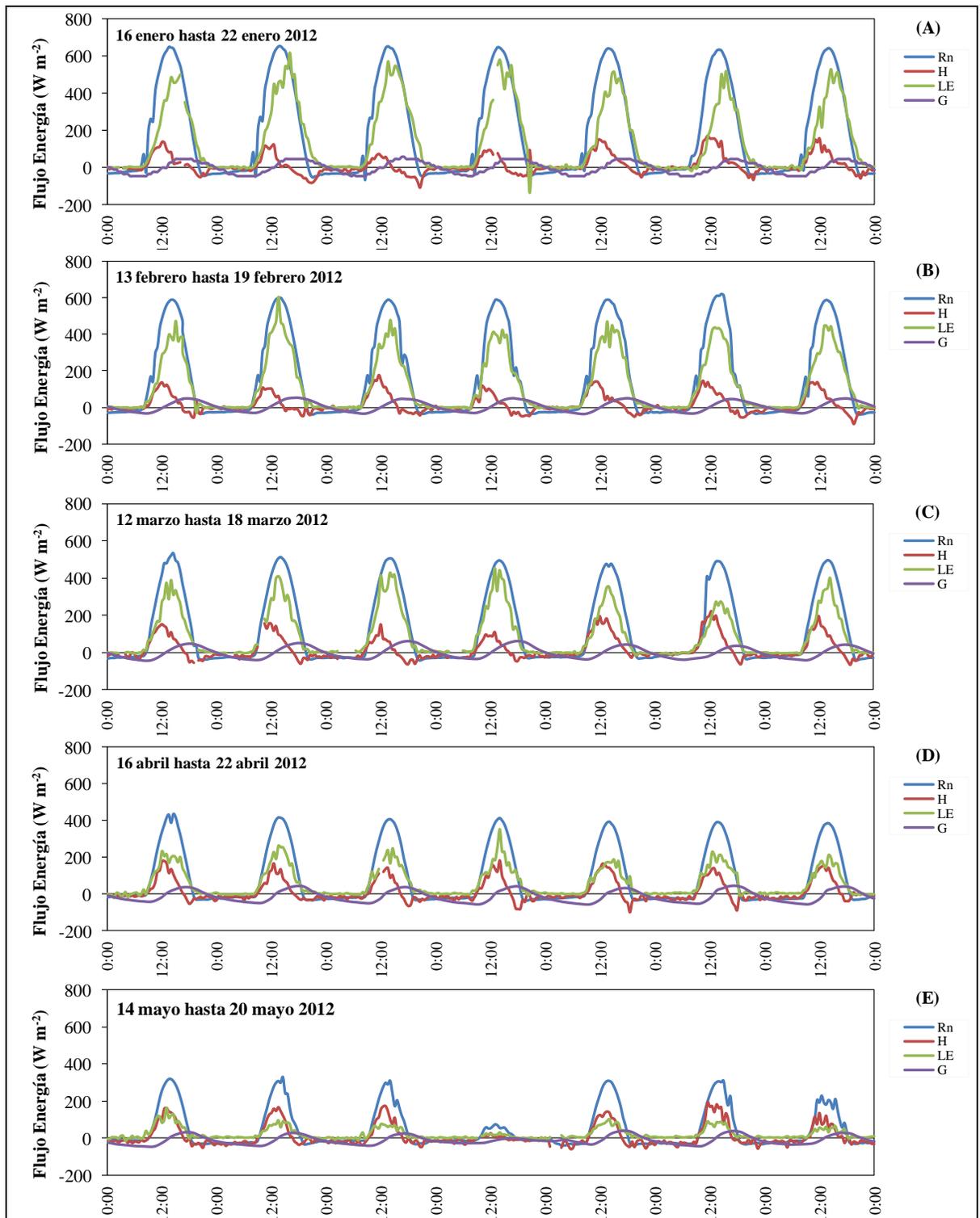


Figura 3. Balance de energía a partir de datos promediados cada 30 minutos de una semana de enero (A), febrero (B), marzo (C), abril (D) y mayo 2012 (E). El tiempo indicado en el eje corresponde a hora civil.

En general, los flujos de energía alcanzaron valores y comportamientos similares por cada mes de análisis, exceptuando aquellos días nublados.

En todos los meses de evaluación no se observó una gran variación en las magnitudes diarias del flujo de calor sensible del suelo, disminuyendo levemente durante el mes de mayo.

En los meses de enero, febrero y marzo (Figura 3, A, B y C), se observa claramente que, cercano al medio día, donde se produce el mayor flujo de energía, el flujo de calor latente alcanzó valores similares a la radiación neta a diferencia del calor sensible del aire que es menor en la tarde con valores negativos, lo que significó una ganancia de energía térmica del sistema. Esta ganancia de energía se pudo traducir en un mayor flujo de calor latente que el correspondiente sólo a radiación neta en este momento del día. Se puede apreciar que LE es ligeramente superior a Rn en las tardes de enero y febrero.

En los meses de abril y mayo (Figura 3, D y E), se observa que, a diferencia de los primeros meses de medición, la energía disponible en el sistema fue menor, por lo tanto, las energías de salida también lo fueron. Además, la dinámica de partición de energía cambió, alcanzando los mayores valores cercano al mediodía los flujos de calor sensible del aire en comparación con los flujos de calor latente, dada la detención de los riegos a fines de la temporada y por la caída de las hojas.

Para la validación de la metodología EC se realizó un balance de energía (Figura 4), considerando los flujos de calor sensible del aire (H), flujos de calor latente (LE), flujos de calor del suelo (G) y radiación neta (Rn). Durante los meses de medición, los cierres fueron bastante buenos con altos niveles de significancia ($p\text{-value} < 0,01$) en las regresiones y altos coeficientes de determinación (R^2), como se observa en la Figura 4, estando dentro del error aceptado dado por la pendiente de la regresión para que la medición sea considerada consistente (relación ideal es 1:1, aceptando hasta 30% de error; Twine *et al.*, 2000). Los valores negativos en la Figura 4 corresponden a datos nocturnos y los positivos, datos diurnos. La dispersión de los datos se debió a la histéresis que se produce entre los datos de la mañana y de la tarde. Esta respuesta se puede relacionar a la mayor turbulencia dada en las horas de la tarde. Cabe considerar que, a pesar de que las mediciones continuaron hasta junio, los datos no se analizaron debido a que no se obtuvo el cierre de energía esperado para validar la metodología.

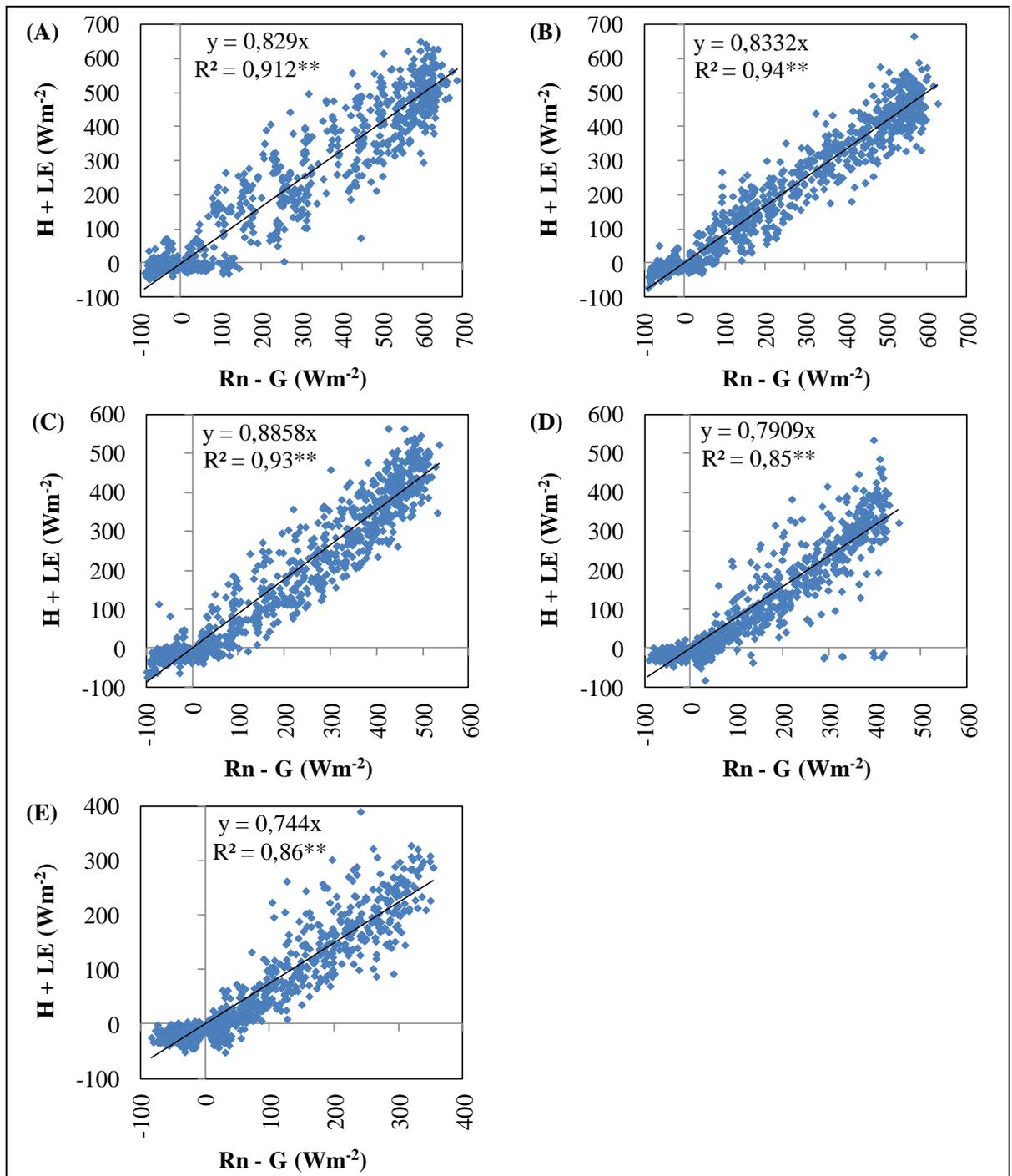


Figura 4. Cierre de energía de (A), enero; (B), febrero; (C), marzo; (D), abril; (E), mayo 2012.

Finalizada la validación del balance energético, fue posible analizar los ciclos diarios de flujos de carbono y agua a partir de los datos brutos medidos por EC, como se observa en la semana del 13 hasta el 19 de febrero, en la Figura 5. El promedio semanal de la integral de los flujos diarios fueron cercanos a $25 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (flujo de entrada al ecosistema) y $4,4 \text{ mm H}_2\text{O día}^{-1}$ (evapotranspirados; flujo de salida del ecosistema). Estos datos debieron ser corregidos por problemas de falta de turbulencia nocturna, para lo cual se debió analizar la relación temperatura nocturna y flujo de CO_2 y las características de turbulencia del aire.

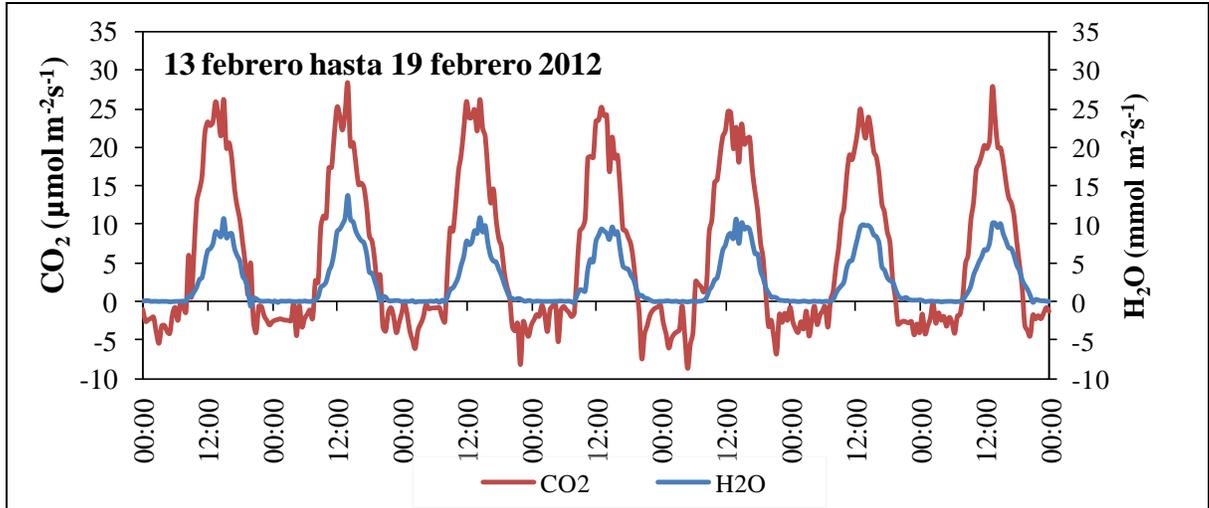


Figura 5. Ciclo diario de flujos de vapor de agua y carbono no corregidos. El tiempo indicado en el eje corresponde a hora civil.

Temperatura del aire y suelo

En la Figura 6, se observa que durante los meses de enero, febrero y marzo de 2012, tanto la temperatura media del aire como la del suelo oscilaron en los 20°C , a diferencia del mes de abril y mayo en donde oscilaron en torno a 15°C y 12°C , respectivamente.

Durante los primeros meses no hubo mayor variabilidad de la media horaria de las temperaturas, especialmente en la del suelo. Específicamente, el error estándar de la temperatura del aire varió entre $0,8^\circ\text{C}$ y $2,3^\circ\text{C}$, y la del suelo entre $0,2^\circ\text{C}$ y $0,4^\circ\text{C}$, desde enero hasta marzo.

Esta situación cambió en los meses de abril y mayo, en donde en las horas de luz aumentó la variación de la temperatura del aire y del suelo. Específicamente, desde abril hasta mayo el error estándar de la temperatura del aire varió entre $1,3^\circ\text{C}$ y $4,6^\circ\text{C}$, y la del suelo entre $0,5^\circ\text{C}$ y $3,4^\circ\text{C}$. Particularmente en mayo, esta mayor variación en la temperatura del suelo pudo deberse a que ya no había cubrimiento por hojas.

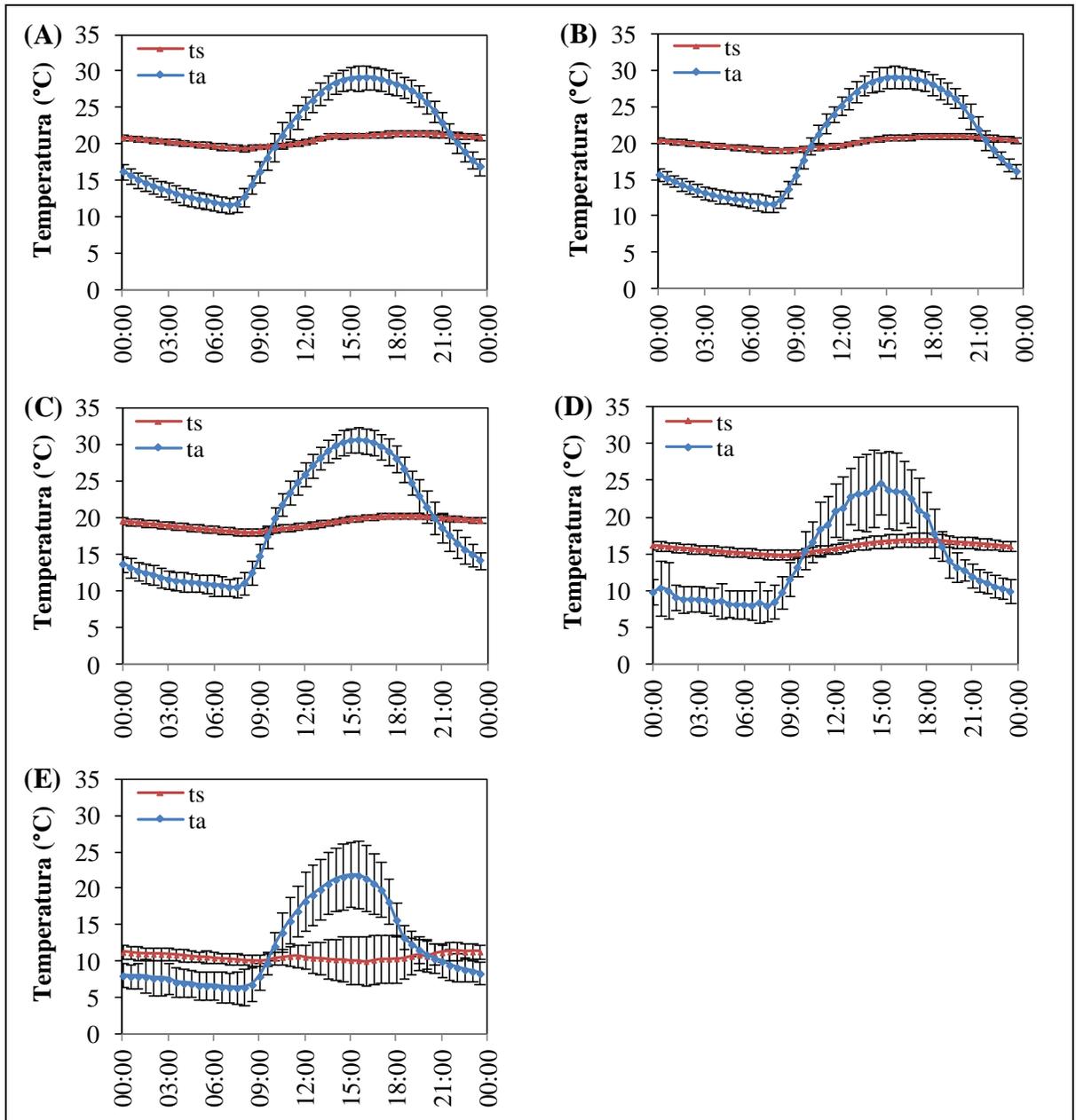


Figura 6. Ciclo diario de la temperatura del aire y del suelo. Los puntos azules (ta: temperatura del aire) y rojos (ts: temperatura del suelo a 10 cm profundidad) representan la media del mes y las barras, el error estándar. (A), enero; (B), febrero; (C), marzo; (D), abril; (E), mayo 2012. El tiempo indicado en el eje corresponde a hora civil.

Características de turbulencia

Velocidad y dirección del viento

El promedio diario de la velocidad del viento durante el periodo de estudio se detalla en el siguiente cuadro, en donde la media se encuentra en torno a $1,3 \text{ m s}^{-1}$ en los primeros meses, disminuyendo fuertemente en abril y mayo.

Cuadro 3. Velocidad media diaria del viento medida por la Torre EC, temporada 2011-2012.

Mes	Velocidad promedio	Desviación estándar
	m s^{-1}	
Enero 2012	1,30	0,30
Febrero 2012	1,40	0,20
Marzo 2012	1,30	0,20
Abril 2012	0,15	0,03
Mayo 2012	0,90	0,14

Durante el periodo de estudio, la dirección del viento preponderante fue del Sur (S), como se observa en la Figura 7.

Velocidad de fricción del viento (μ^*)

La velocidad de fricción del viento, entendida como una medida de la intensidad de la turbulencia, se presenta en la Figura 8. La mayor velocidad de fricción del viento, μ^* , ocurre durante las horas de luz del día. También se puede sugerir que el comportamiento durante el día de μ^* sigue una tendencia similar a la temperatura del aire, desplazándose el valor “peak” pasado el medio día.

A medida que avanzan los meses, el error estándar del valor medio de μ^* en cada punto es mayor, especialmente, en las horas del día. Esto se acentúa en el mes de mayo, siendo menos clara la tendencia de μ^* en el ciclo diario.

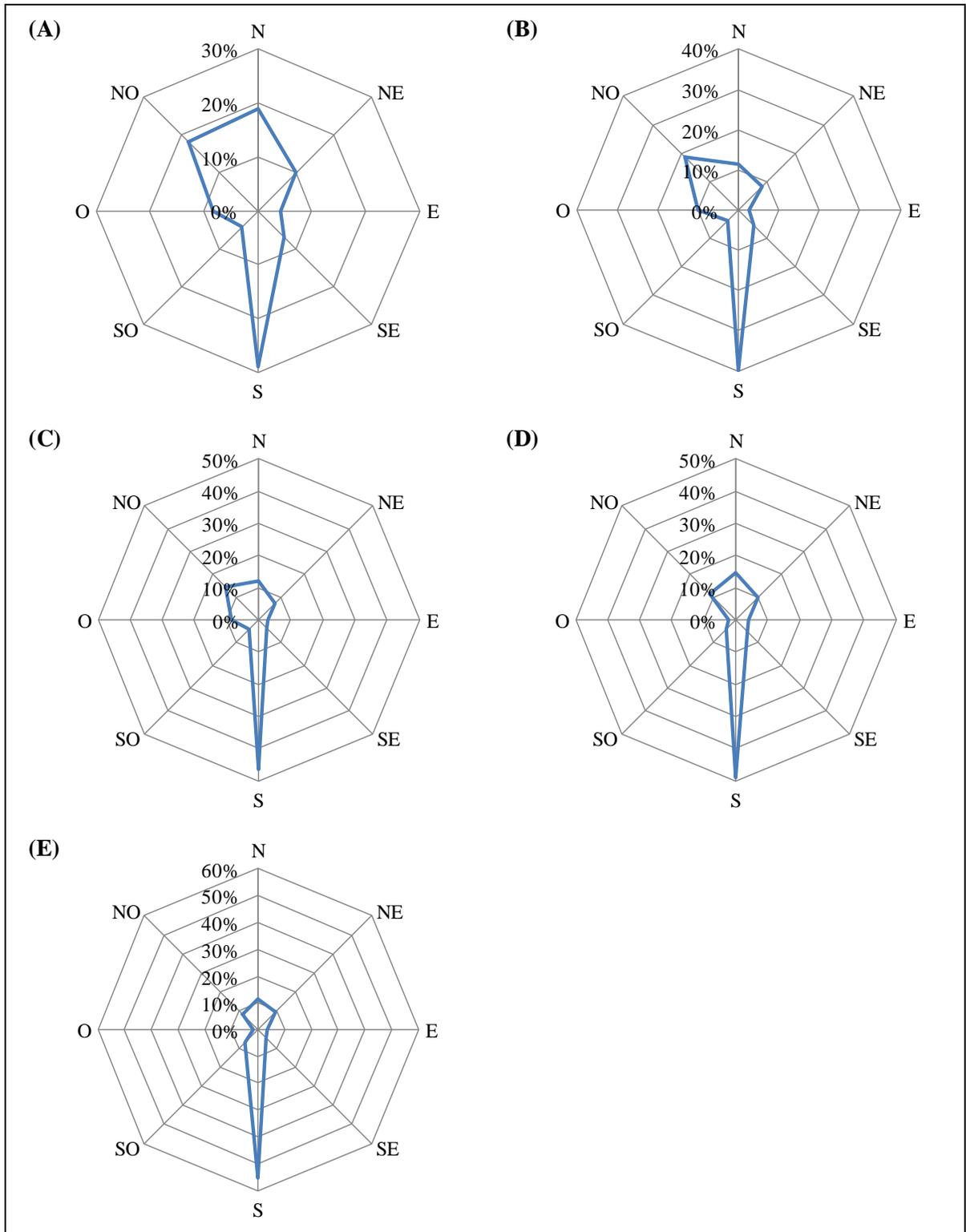


Figura 7. Frecuencia porcentual de la dirección del viento. (A), enero; (B), febrero; (C), marzo; (D), abril; (E), mayo 2012.

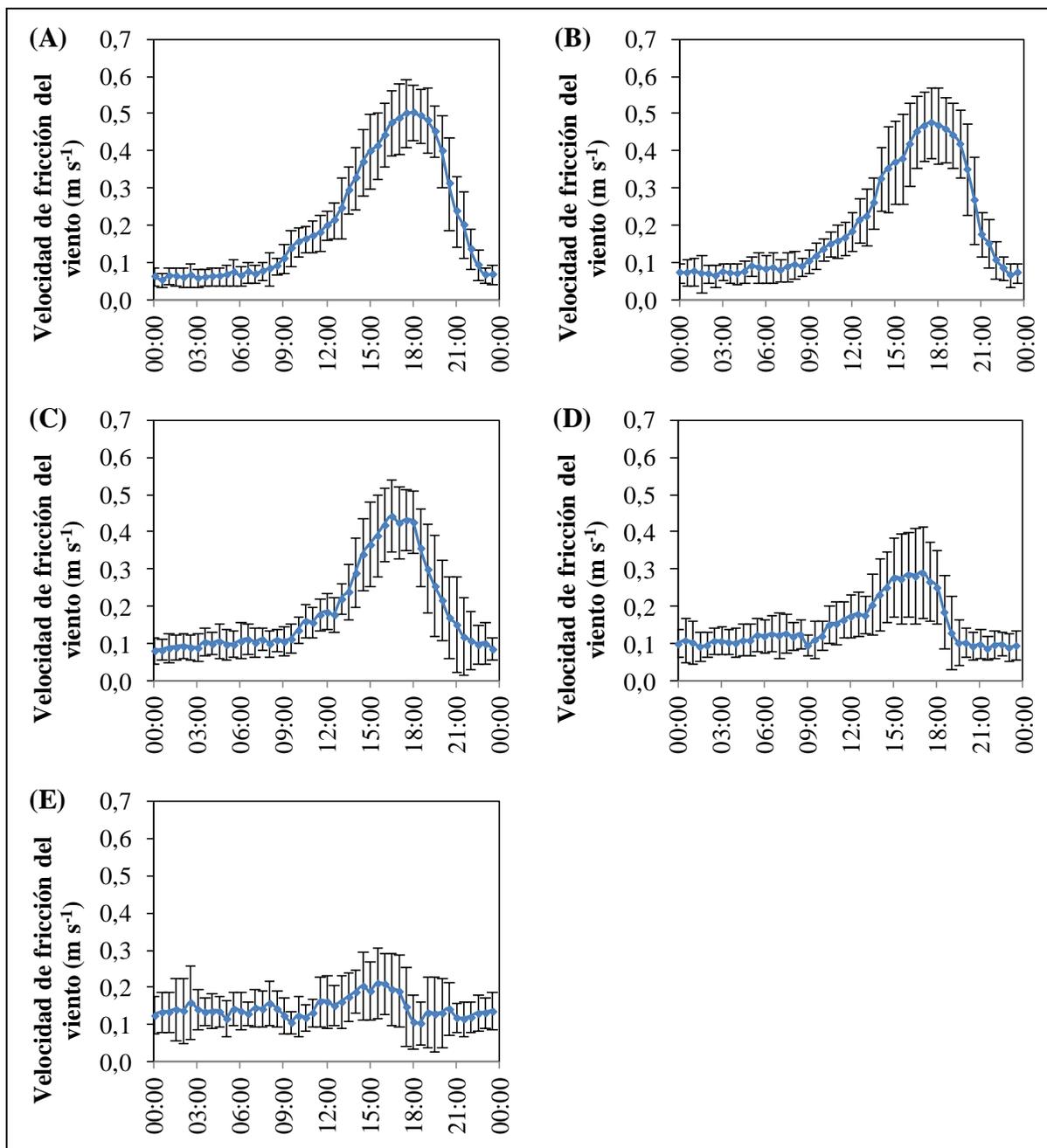


Figura 8. Ciclo diario de la velocidad de fricción del viento (μ^*). Los puntos representan la media del mes y las barras, el error estándar. (A), enero; (B), febrero; (C), marzo; (D), abril; (E), mayo 2012. El tiempo indicado en el eje corresponde a hora civil.

Conociendo el comportamiento de la velocidad de fricción del viento y los flujos de carbono nocturnos, se obtuvieron rangos de μ^* , en donde la media de estos flujos se mantuvo constante sin presentar gran variación (error estándar) a medida que μ^* aumentaba (Figura 9).

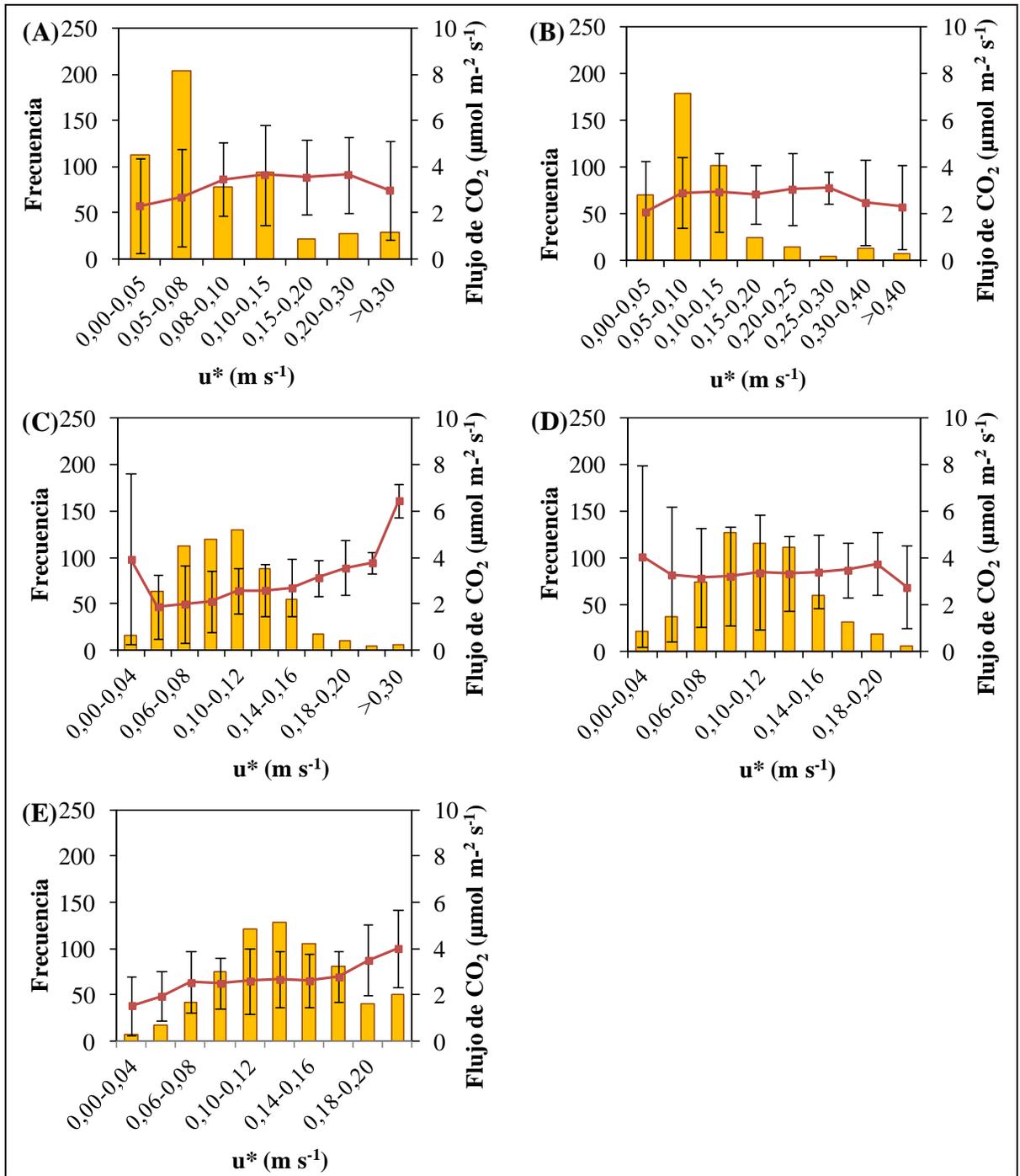


Figura 9. Flujo de CO₂ en periodos nocturnos y su correspondiente número de datos cada 30 minutos para cada rango de μ^* (velocidad de fricción del viento, m s^{-1}). (A), enero; (B), febrero; (C), marzo; (D), abril; (E), mayo 2012. La barras amarillas son el número de datos cada 30 minutos y los cuadros rojos son el promedio de los flujos con error estándar en cada rango de μ^* .

El rango óptimo de μ^* para seleccionar datos de flujos de carbono nocturnos durante el mes de enero varió desde $0,08 \text{ m s}^{-1}$ hasta $0,30 \text{ m s}^{-1}$; en febrero, desde $0,05 \text{ m s}^{-1}$ hasta $0,30 \text{ m s}^{-1}$; en marzo, desde $0,04 \text{ m s}^{-1}$ hasta $0,16 \text{ m s}^{-1}$; en abril, desde $0,04 \text{ m s}^{-1}$ hasta $0,20 \text{ m s}^{-1}$; y en mayo, desde $0,06 \text{ m s}^{-1}$ hasta $0,18 \text{ m s}^{-1}$. Los datos eliminados por el filtro de μ^* de enero representan 52%; febrero, 28%; marzo, 16%; abril, 10%; y mayo, 23% de los datos nocturnos del mes, aproximadamente.

Relleno de la serie de tiempo de CO_2

Después de filtrar los datos, los espacios dejados en las series de tiempo fueron rellenos mediante distintas metodologías. Primero, se intentó encontrar una relación entre temperatura del aire y suelo con las mediciones cada media hora de los flujos nocturnos de CO_2 pero se obtuvo un bajo ajuste en todas las regresiones hechas en cada mes, descartando este método. En la Figura 10, se muestra un ejemplo del mal ajuste de los datos del mes de febrero con el modelo de respiración exponencial propuesto en la ecuación 3.

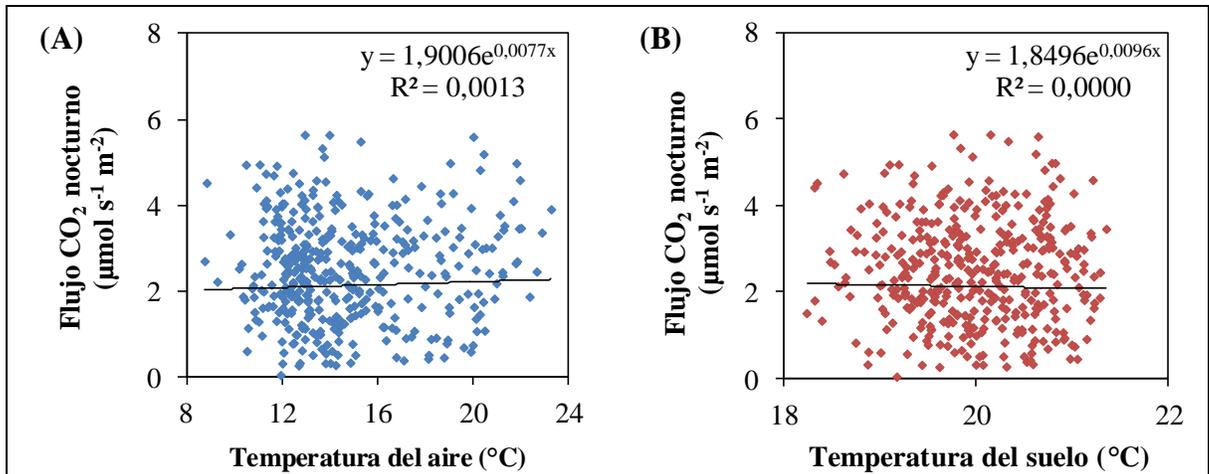


Figura 10. Relación entre temperatura del aire (A) y del suelo en los primeros 10 cm de profundidad (B) con el flujo nocturno de CO_2 medidos cada media hora durante el mes de febrero 2012.

Después, se observó en el set de datos que la variación entre horas de los flujos nocturnos fue muy baja en toda la temporada y además, los espacios generados post-filtro eran pequeños (inferiores a 4 horas), por lo que se optó por realizar interpolaciones para completar la serie de datos en el tiempo, conservando la media nocturna y baja variación observada inicialmente.

Durante el día, también se rellenan los espacios mediante interpolaciones. Estos fueron causados por fallas instrumentales a diferencia de la noche en donde la baja turbulencia fue el principal problema. Posterior a este proceso, se realizó el balance diario de carbono.

Longitud de “fetch”

Durante los meses de medición, el 70% de “fetch” fue de 84 m y el 90% de “fetch”, de 126 m, en promedio (Figura 11). Cabe considerar que esta media se obtuvo en base a los valores dados entre las 12:00 pm y 20:30 pm desde enero hasta marzo, y entre las 12:00 pm y 18:00 pm desde abril hasta mayo, aproximadamente, representando el 30% de los datos obtenidos. En las horas restantes no se pudo calcular el parámetro ya que uno de los requerimientos para la estimación es que la velocidad de fricción del viento, μ^* , sea mayor a $0,20 \text{ m s}^{-1}$, lo cual no se cumplió.

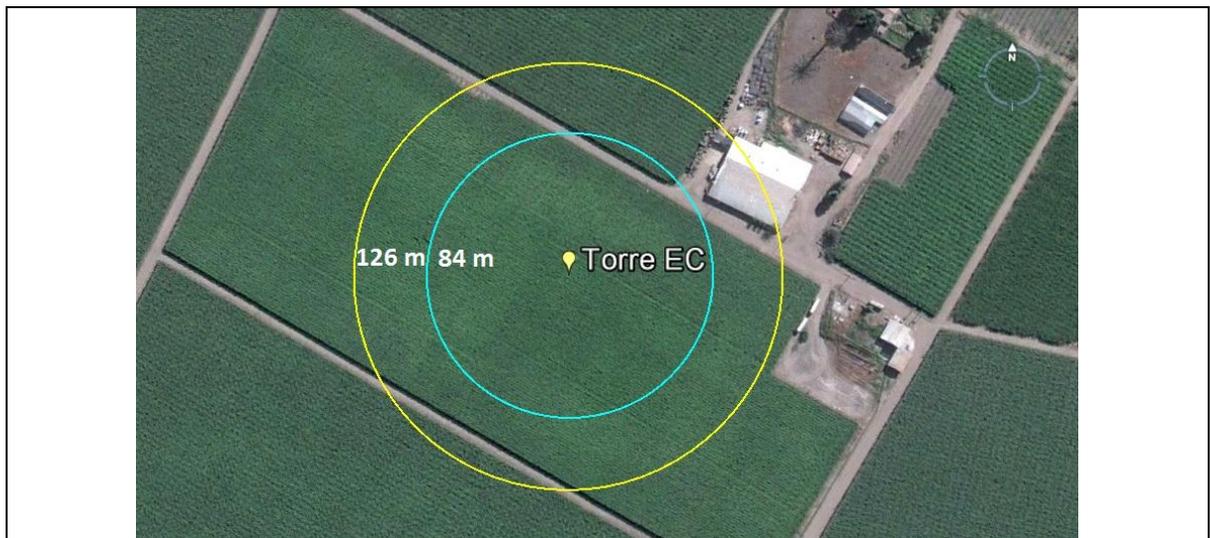


Figura 11. Longitud promedio estimada de “fetch” para la medición del 70% y 90% de los flujos desde enero hasta mayo 2012. El marcador indica el punto donde se ubica la torre.

Variación del contenido de agua en el suelo

La capacidad de campo del suelo correspondió a 280 mm y el punto de marchitez permanente, aproximadamente, a 140 mm.

El contenido de agua, en términos de altura (mm), entre 10 cm y 100 cm de profundidad del suelo, desde enero hasta marzo de 2009, varió entre 282 mm, el 14 de enero y 268 mm, el 31 de marzo. El contenido promedio del período fue de 276 mm. Durante la temporada 2008-2009, la cantidad de agua total aplicada en el riego fue de $9.120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Cuadro 4).

Cuadro 4. Cantidad de agua aplicada en el riego al parrón, mensual y total durante la temporada 2008-2009.

Mes	Riego mm
Septiembre	20,5
Octubre	77,5
Noviembre	127,7
Diciembre	175,6
Enero	239,4
Febrero	175,6
Marzo	95,8
Total	912,0

Fuente: Villagra (2011).

El contenido de agua del suelo, entre los 10 cm y 100 cm de profundidad, desde el 16 de septiembre del 2009 hasta el 31 de marzo de 2010, varió entre 261 mm, el 5 de octubre y 281 mm, el 15 de diciembre. El contenido de agua promedio de la temporada fue de 274 mm. El Cuadro 5 presenta la cantidad de agua aplicada en el riego, total y mensual, del predio durante la temporada 2009-2010, siendo $9.804 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ el total de la temporada.

Cuadro 5. Cantidad de agua aplicada en el riego al parrón, mensual y total durante la temporada 2009-2010.

Mes	Riego mm
Septiembre	41,0
Octubre	77,5
Noviembre	79,8
Diciembre	207,5
Enero	255,4
Febrero	127,7
Marzo	191,5
Total	980,4

Fuente: Villagra (2011).

Aunque no se midió el contenido hídrico del suelo hasta los 100 cm de profundidad durante la temporada 2011-2012, las mediciones hechas hasta los 10 cm de profundidad se mantuvieron constantes en torno a 380 mm, desde octubre 2011 hasta fines de marzo 2012.

Los valores de la cantidad de agua aplicada por riego fueron similares a las temporadas anteriores, manteniendo el patrón de distribución del agua en todo el periodo (Cuadro 6), en donde la cantidad de agua total aplicada fue de $10.041 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, aproximadamente.

Cuadro 6. Cantidad de agua aplicada en el riego al parrón, mensual y total durante la temporada 2011-2012.

Mes	Riego
	mm
Septiembre	41,0
Octubre	88,9
Noviembre	143,6
Diciembre	255,3
Enero	223,4
Febrero	163,0
Marzo	88,9
Total	1.004,1

Evolución del índice del área foliar y de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada

En la Figura 12, se observa que el índice de área foliar (IAF) aumentó siguiendo una curva sigmoidea, en donde se esperó que en los primeros meses de la temporada, cuya fracción de interceptación de radiación (f) fue menor, la captación de CO_2 desde la atmósfera fuera mínima o nula. Incluso, podría estar liberándose CO_2 desde el parronal hacia la atmósfera, principalmente por respiración.

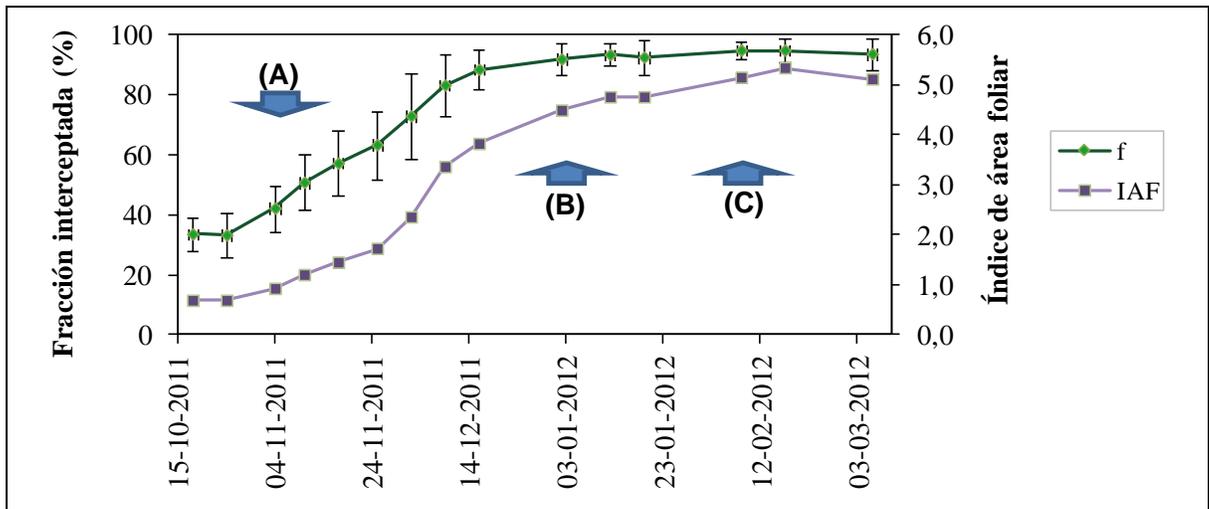


Figura 12. Evolución del índice del área foliar (IAF) y fracción interceptada (f , %) en uva de mesa cv. Thompson Seedless, conducida en parronal español. Las barras representan el error estándar. (A), cuaja de frutos; (B), envero; (C), cosecha de frutos.

Con un IAF cercano a 5 se alcanza una fracción de radiación interceptada del 95 % aproximadamente. En este periodo, se esperó la mayor captación de carbono desde la atmósfera. Luego, a fines de marzo, el IAF y f comenzaron a disminuir ligeramente, esperándose a que bajaran también los valores de fijación de carbono durante el día.

Balance de Carbono

Los flujos de carbono presentados a continuación, se corrigieron de acuerdo al filtro μ^* y las series de CO_2 en el tiempo se rellenaron mediante los métodos explicados anteriormente.

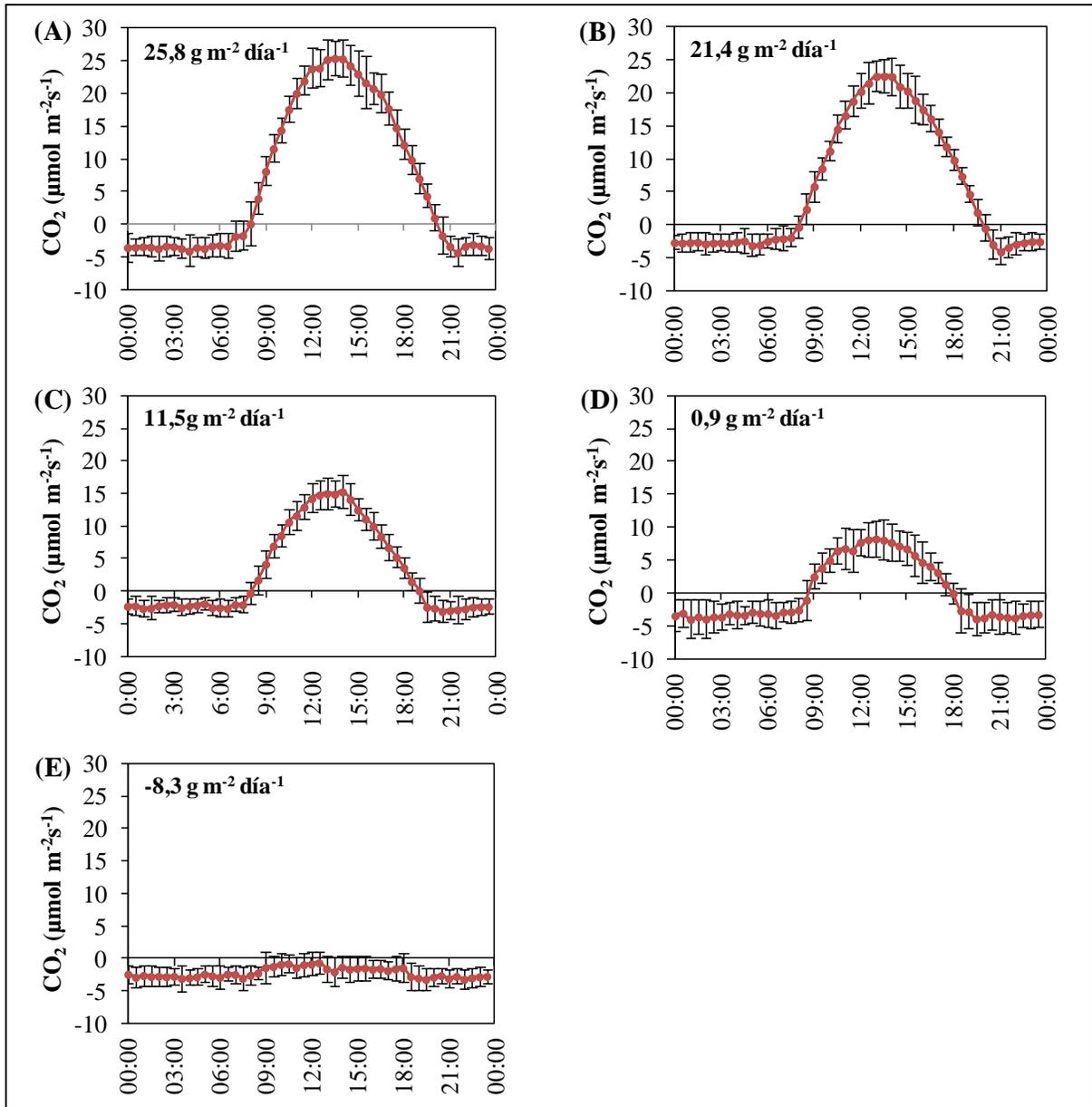


Figura 13. Ciclo promedio diario de flujos de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Los puntos representan la media del mes, y las barras, el error estándar. (A), enero; (B), febrero; (C), marzo; (D), abril; y (E), mayo 2012, indicándose el valor medio de las integrales de los flujos diarios en cada mes. El tiempo indicado en el eje corresponde a hora civil.

De acuerdo a la Figura 13, durante el día, los mayores valores observados en los flujos de entrada fueron entre las 13:00 hrs y 14:00 hrs, cercano a los $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante enero y febrero, y $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante marzo, representando la ganancia de carbono del ecosistema. Durante abril, los niveles de fijación de carbono disminuyeron considerablemente, llegando a $8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con mayores variaciones entre los días. Finalmente, en mayo el proceso predominante resultó ser la respiración ecosistémica, de muy baja magnitud.

En toda el periodo de medición, no existió una gran variación de los flujos de CO_2 nocturnos, alcanzando valores alrededor de los $-3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

En la Figura 14, se observan tanto los flujos netos de entrada como de salida de CO_2 y el balance del día, representativo al área de medición de la torre EC.

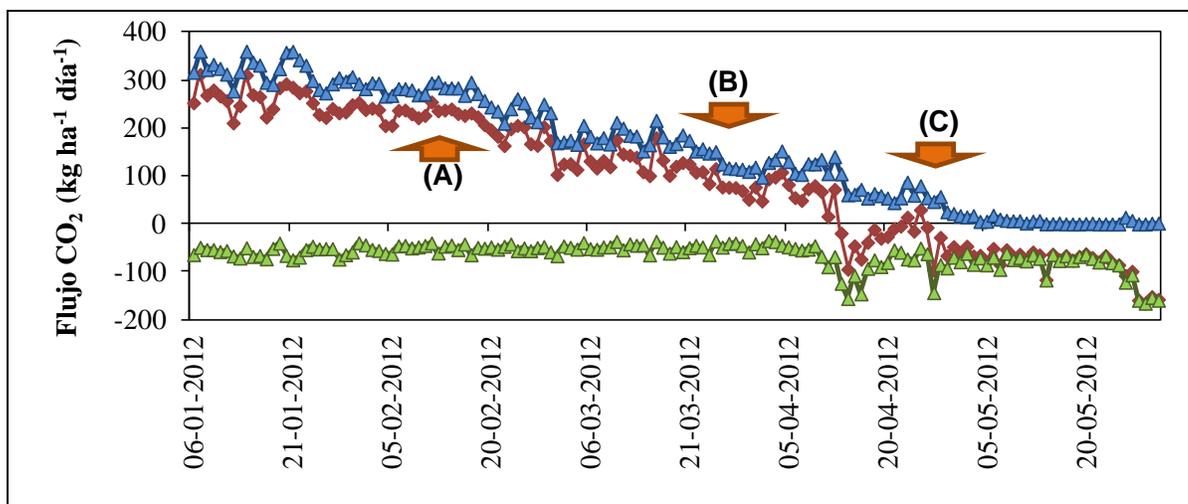


Figura 14. Balance diario de los flujos de CO_2 (rombos rojos), flujos netos de entrada de CO_2 (triángulos azules) durante las horas diurnas y flujos netos de salida de CO_2 (triángulos verdes) durante las horas nocturnas, desde enero hasta mayo 2012. (A), periodo de cosecha; (B), comienzo de senescencia de hojas; (C), caída total de hojas.

A medida que pasaron los días, el valor del balance diario de CO_2 disminuyó, principalmente, por la disminución de la fijación de CO_2 . A partir de mediados del mes de abril, la media diaria de los flujos netos se vuelve negativa, exceptuando algunos días, dado que aumentaron los flujos de salida del sistema y, prácticamente, los flujos de entrada fueron nulos.

Durante el periodo de estudio, el cultivo de la vid se comportó como un sumidero, acumulando $3,9 \text{ t C ha}^{-1}$. Se observa en la Figura 15 un claro aumento de carbono fijado, manteniendo la tasa de acumulación de $70,5$ y $58,7 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, en promedio, durante los dos primeros meses de estudio. En marzo, esta tasa de acumulación disminuyó a $31,5 \text{ kg C}$

$\text{ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, aportando menos a la ganancia total de carbono al sistema. Y desde abril en adelante, esta tasa disminuye progresivamente, llegando a ser negativa.

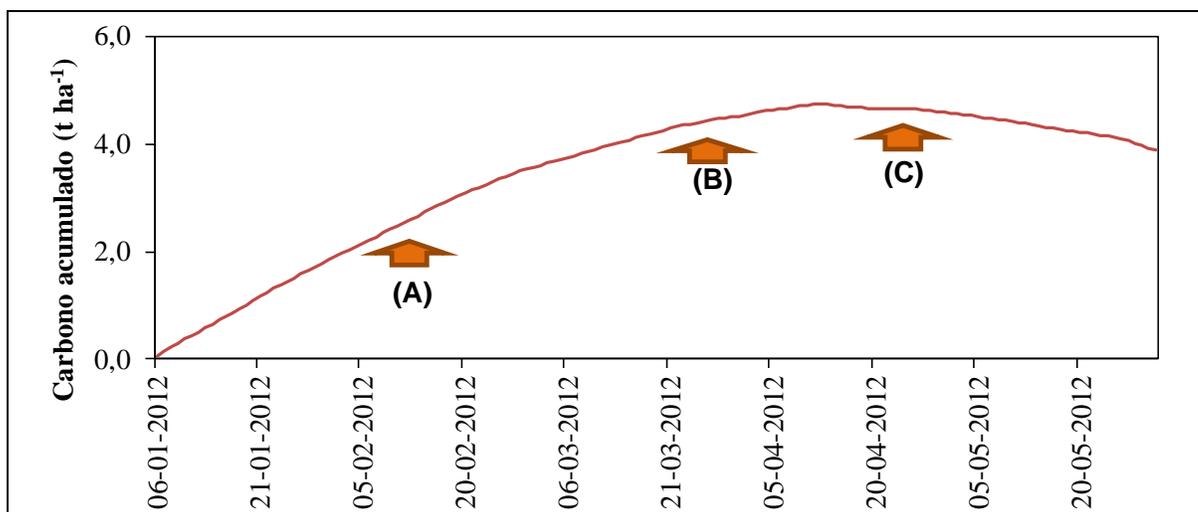


Figura 15. Carbono acumulado (t ha^{-1}) por un parronal de uva de mesa durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo 2012. (A), periodo de cosecha; (B), comienzo de senescencia de hojas; (C), caída total de hojas.

Se realizaron relaciones entre radiación global (R_g) y flujos de CO_2 diurnos (considerándose aquellos datos asociados a una radiación global mayor a 0 W m^{-2}), y se compararon con las relaciones hechas durante los mismos meses con radiación global interceptada (R_{gi} , Figura 16), en base al coeficiente de determinación (R^2) y al cuadrado medio del error (CME). No se hizo este análisis en mayo ya que no había interceptación de radiación por la caída total de hojas. Todas las relaciones fueron positivas y estadísticamente significativas desde enero hasta abril ($p\text{-value} < 0,01$).

Durante enero y febrero, se obtuvieron R^2 de 89% y CME de 12, tanto para las relaciones con R_g como para las hechas con R_{gi} . La mayor pendiente en las regresiones y baja dispersión de los datos en estos dos meses pudo deberse a la máxima interceptación de radiación solar, cercano a 95 %, y por la alta actividad fotosintética.

En marzo y abril, las pendientes de las regresiones disminuyeron y también los coeficientes de determinación. Las relaciones con R_{gi} tuvieron R^2 levemente mejores que con R_g . Los CME durante marzo fueron iguales, en cambio, en abril, el CME correspondió a 13,7 cuando se relacionó con R_g , mientras que cuando se relacionó con R_{gi} , disminuyó a 13,4.

De esta forma, es evidente el efecto de la interceptación de la radiación y la actividad fotosintética a medida que avanza la temporada en los flujos de CO_2 .

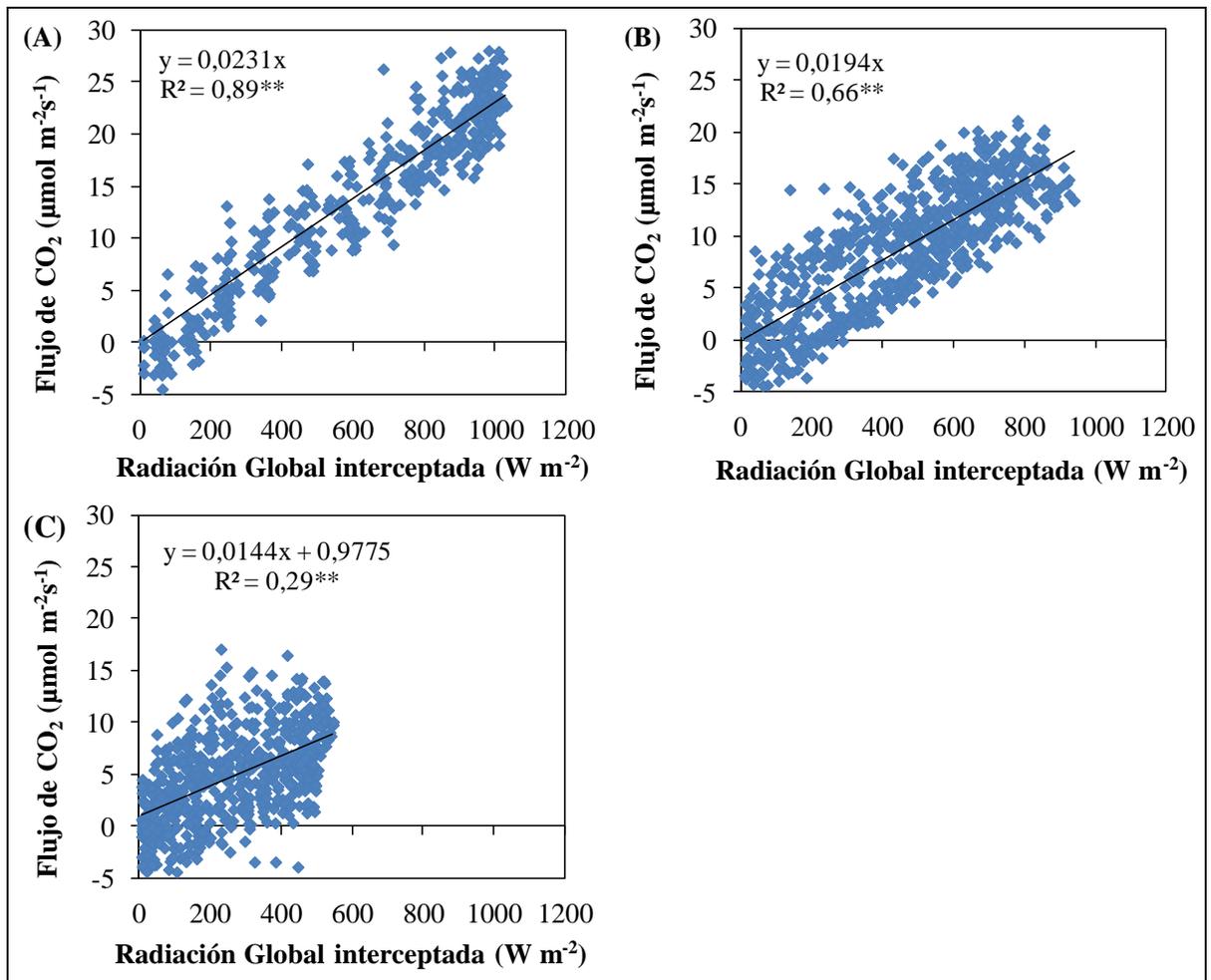


Figura 16. Relación entre los flujos de CO₂ y la radiación global interceptada ($> 0 \text{ W m}^{-2}$). (A), enero y febrero; (B) marzo y (C), abril 2012.

A partir de la Figura 15, se obtuvieron valores de eficiencia del uso de la radiación (EUR) del ecosistema para cada mes, calculando la pendiente de cada regresión. Específicamente, durante enero y febrero, la EUR fue de $1,02 \text{ g CO}_2 \text{ MJ}^{-1} \text{ Rgi}$; durante marzo, correspondió a $0,85 \text{ g CO}_2 \text{ MJ}^{-1} \text{ Rgi}$; y durante abril, $0,63 \text{ g CO}_2 \text{ MJ}^{-1} \text{ Rgi}$.

Estimación de biomasa acumulada en la temporada y contenido de carbono

Debido a que el tamaño de la muestra de brotes para calcular materia seca en cada mes fue muy pequeña, se hizo una relación entre diámetro basal de brotes y materia seca asociada (Figura 17). Para lograr una mejor estimación, se dividió el periodo de muestreo en dos para realizar las regresiones lineales. La primera regresión lineal correspondió a las mediciones hechas al inicio de la temporada (18 de octubre y 22 de noviembre) y la segunda, correspondió a las mediciones realizadas en la mitad y final de la temporada (28 de diciembre hasta 27 de marzo). No se consideró ajustar las mediciones a un modelo sigmoideo ya que los errores en la estimación posterior fueron mayores.

Luego se pudo estimar materia seca para cada diámetro basal de brote medido cada mes durante la temporada. Esta relación se cumplió hasta marzo debido a que el diámetro de los brotes no siguió aumentando.

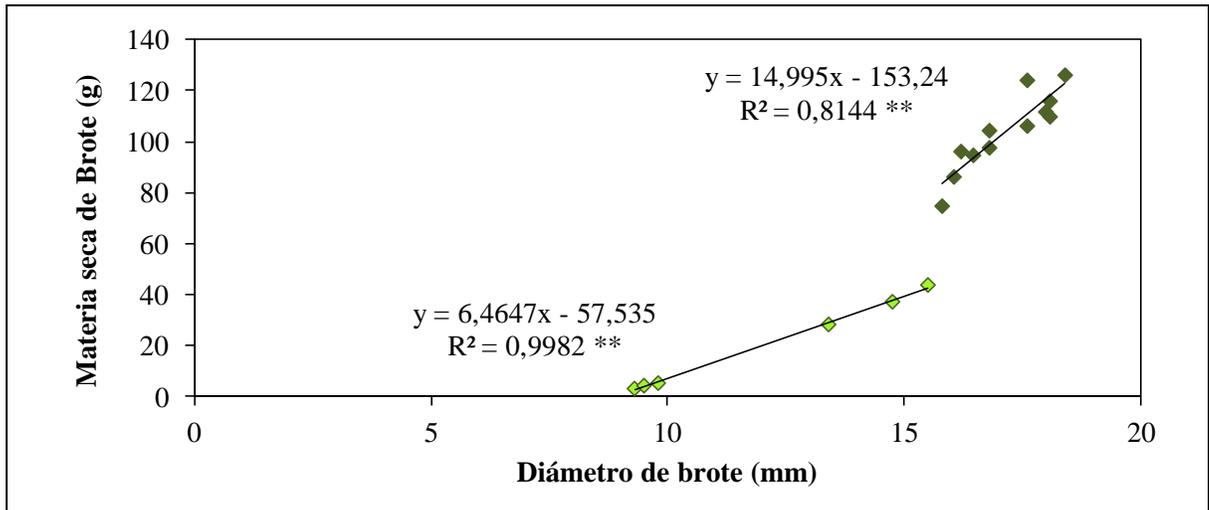


Figura 17. Relación entre materia seca de brotes y diámetro basal de brotes al inicio de la temporada (rombos claros) y a la mitad y final de la temporada (rombos oscuros).

La acumulación de materia seca estimada de brotes y racimos por unidad de superficie de suelo durante la temporada se muestra en la Figura 18. Para esto se consideraron 60 brotes por planta y 27 racimos por planta en un marco de plantación de 3,5 m x 1,75 m. Al inicio de la temporada no existió mayor variación en el crecimiento de los brotes. Condición que cambió desde diciembre en adelante debido al gran impacto que tiene una pequeña variación del diámetro del brote en la estimación de la materia seca acumulada y por las diferencias en el vigor de las plantas.

La mayor tasa de acumulación de materia seca en brotes fue a inicios de la temporada hasta fines de diciembre, siendo clara la disminución de la acumulación en brotes desde diciembre en adelante, debido a la mayor demanda de asimilados de los frutos,

observándose por el cambio en la pendiente de la curva de acumulación de materia seca en frutos. La cosecha de racimos empezó la segunda semana de febrero por lo que en esta fecha se estimó el rendimiento, considerando 2 racimos por cuadrante.

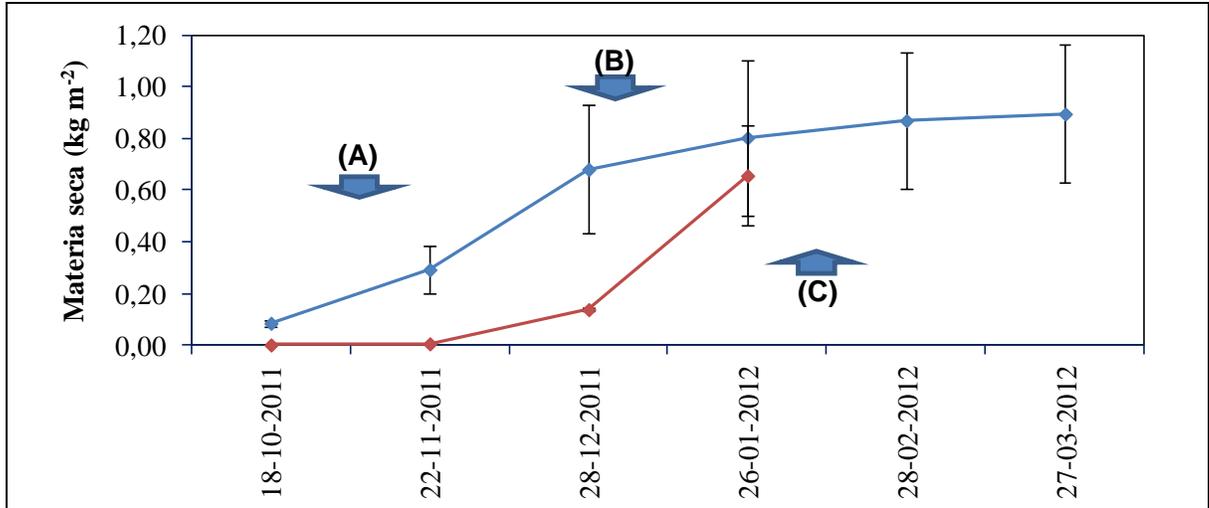


Figura 18. Evolución de materia seca por unidad de superficie de suelo (kg m⁻²) de brotes (línea azul) y racimos (línea roja) de uva de mesa cv. Thompson Seedless. Los puntos representan la media y las barras, el error estándar. (A), cuaja de frutos; (B), envero; (C), cosecha de frutos.

Se procedió a comparar las tasas de acumulación entre los periodos en que se tomaron muestras de brotes y racimos (Cuadro 7) con las mediciones de EC, considerando que el 50% de la materia seca corresponde a carbono (Mota *et al.* 2010). A partir de estos datos, los únicos periodos que se pudieron comparar con las mediciones de la torre EC fueron entre diciembre y febrero.

Desde fines de diciembre hasta fines de enero, los frutos presentaron la mayor tasa de acumulación de biomasa comparado con el crecimiento de brotes, que disminuía progresivamente (Figura 18). Para este periodo, la tasa de acumulación promedio de carbono medido por la torre EC fue de 71,3 kg C ha⁻¹ día⁻¹, claramente menor a la tasa de acumulación de carbono del racimo. Y la tasa de acumulación de carbono entre brotes y racimos es mayor en un 53% con respecto a la tasa medida por EC.

En los periodos comprendidos entre fines de enero y fines de marzo, en los cuales sólo hubo medición de biomasa de brotes, la tasa de acumulación de carbono en biomasa representó el 15% de la fijación de carbono medido por la metodología EC entre fines de enero y febrero, y el 13%, entre fines de febrero y marzo.

Posterior a marzo, no se continuó con las mediciones de biomasa de brotes y racimos por lo que no se realizó la comparación con la estimación de carbono mediante EC. Desde fines de marzo, las tasas de acumulación fueron progresivamente más bajas, llegando a ser

negativas a partir del 12 de abril, representando pérdidas desde el ecosistema hacia la atmósfera.

Cuadro 7. Tasa de acumulación promedio de materia seca y de carbono estimado en racimos y brotes, y carbono medido por el sistema EC, temporada 2011-2012.

Periodo	Racimos (R)		Brotes (B)		Total (R+B)	C _{EC} ¹
	kg MS ² ha ⁻¹ día ⁻¹	kg C ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹	kg C ha ⁻¹ día ⁻¹	kg C ha ⁻¹ día ⁻¹	
18/10- 21/11	1,2	0,6	59,6	29,8	30,4	-
22/11- 27/12	36,8	18,4	118,6	59,3	77,7	-
28/12- 25/01	178,8	89,4	39,4	19,7	109,1	71,3
26/01- 27/02	-	-	17,9	8,9	8,9	60,1
28/02- 26/03	-	-	8,8	4,4	4,4	33,9
27/03- 11/04	-	-	-	-	-	19,2
12/04- 31/05	-	-	-	-	-	-17,6

¹C_{EC}: flujo de carbono medido por "Eddy covariance".

²MS: materia seca

³C: carbono

Claramente, se observan diferencias entre las tasas de acumulación de carbono por ambos métodos de estimación. Sin embargo, al comparar la cantidad acumulada total, la diferencia disminuye aproximadamente a un 10%, como se observa en el Cuadro 8. De todas formas, la estimación por el sistema EC siguió siendo menor.

Cuadro 8. Cantidad de carbono acumulado, estimado en racimos y brotes, y carbono medido por el sistema EC.

Periodo	Racimos (R)	Brotes (B)	Total (R+B)	C _{EC}
	kg C ha ⁻¹			
06/01-25/01	1788,0	393,6	2181,6	1509,7
26/01-08/02	284,0	125,1	409,1	831,8
Total	2072,0	518,7	2590,7	2341,5

En el Cuadro 8, sólo se compara el carbono acumulado entre el 6 de enero y 8 de febrero, ya que las mediciones de EC comenzaron a inicios de enero y la cosecha de la fruta, en la segunda semana de febrero. Para estimar el carbono acumulado en racimo hasta la fecha de

cosecha, se consideró la materia seca acumulada el 26 de enero y los datos de rendimiento del 8 de febrero para obtener la tasa de acumulación entre ambas fechas.

A partir de la estimación de materia seca acumulada en brotes y el rendimiento de racimos obtenido en la segunda semana de febrero, se pudo estimar la cantidad de materia seca acumulada por hectárea por estos dos órganos. A fines de junio de 2012, se pesó el material de poda. Considerando que el 50% de la materia seca corresponde a carbono (Mota *et al.* 2010), se estimó el contenido de carbono en el material vegetal medido al final de la temporada.

Cuadro 9. Resumen de variables medidas para la estimación materia seca y contenido de carbono en racimos, brotes y restos de poda, temporada 2011-2012.

Item	Valor	Unidad
Marco plantación	3,5 m x 1,75 m	
N° Plantas / ha	1632	
Materia seca / racimo	162	g
N° Racimos / planta	27	
Materia seca racimo / planta	4,4	kg
Materia seca racimos / ha	7,2	t
Contenido de C racimos / ha	3,6	t
Materia seca/brote	90	g
N° Brotes / planta	60	
Materia seca brotes/ planta	5,4	kg
Materia seca brotes / ha	8,8	t
Contenido de C en brotes / ha	4,4	t
Materia seca de restos de poda/planta	1,7	kg
Materia seca de restos de poda/ ha	2,7	t
Contenido de C en restos de poda / ha	1,4	t

El rendimiento del huerto en la temporada 2011-2012 fue de 32.241 kg de racimos ha⁻¹ que traducido a carbono, corresponde a 3,2 t C ha⁻¹, aproximadamente, asumiendo un 85% de contenido de humedad en racimos. Este valor fue cercano a la estimación de contenido de carbono realizada en racimo de 3,6 t C ha⁻¹ (Cuadro 9).

El contenido de carbono en los restos de poda fue menor que el de los brotes ya que no se consideró el peso de las hojas caídas ni los sarmientos que serán productivos en la próxima temporada, por lo que sólo representó un 30% del carbono contenido en la materia seca acumulada en brotes, finalmente.

DISCUSIÓN

Debido a los problemas que surgieron por el mal funcionamiento de la torre EC, no se pudo probar la hipótesis ya que el periodo de mediciones con datos confiables fue menor a lo establecido originalmente. Por esta razón, este ítem se centrará en la discusión de la capacidad del sistema EC para estimar los flujos de carbono en las condiciones del sitio y en la comparación del carbono acumulado en biomasa y lo estimado por el sistema EC en los meses con datos válidos.

Se ha visto que el manejo agrícola del huerto puede alterar tanto el balance energético como los flujos de carbono del sistema, como por ejemplo, la programación del riego, labranza del suelo, el manejo de la cobertura del suelo y los sistemas de conducción de las plantas. El sistema de conducción, en particular, puede afectar la interceptación de la radiación, y en consecuencia, la disponibilidad de carbono en la planta, teniendo un alto impacto en la calidad y cantidad de la fruta producida (Carbonneau *et al.*, 2000; García de Cortázar *et al.*, 2005; Orlandini *et al.*, 2008). En este estudio, el comportamiento de los componentes del balance energético del sistema, durante los primeros dos meses de medición fue similar (Figura 3), representando LE, H y G aproximadamente el 94%, 3% y 2% de la energía disponible (R_n), respectivamente, valores cercanos a investigaciones de otros autores (Rossi *et al.*, 1996; Villagra, 2011). En cambio, otros estudios en vid han mostrado que LE alcanza cerca del 40-50% de la energía disponible (Heilman *et al.*, 1996; Spano *et al.*, 2004; Nardino *et al.*, 2007; Spano *et al.*, 2008), asociando estos valores principalmente a la menor interceptación de radiación por la baja cobertura del dosel, dado un sistema de conducción en espaldera, a diferencia del parronal en estudio, en donde se interceptó el 95% de la radiación fotosintéticamente activa en el periodo de máxima cobertura foliar (Figura 12).

El análisis de balance de energía realizado mensualmente mostró un alto cierre entre los datos $c/30$ min, con un error de 10-25% (Figura 4). Aunque no se mostraron los cierres separados temporalmente en el día y la noche, se encontró que fallaba notablemente en condiciones de estabilidad atmosférica nocturna, con muy baja turbulencia (velocidad de fricción del viento, μ^* , menor a $0,15 \text{ m s}^{-1}$). Estos resultados coinciden con una parte del análisis realizado por Franssen *et al.* (2010), relacionando esta falta de cierre a la estabilidad atmosférica nocturna originada por la baja turbulencia inducida mecánicamente (es decir, por viento). Los mismos autores mencionan que el cierre nocturno podría mejorarse si se consideran las mediciones de almacén de calor en el suelo. El problema del cierre de energía cambia durante el día ya que la turbulencia puede generarse termalmente o mecánicamente, estando dentro de los valores aceptados para la metodología EC.

Por otra parte, Foken (2008), en su revisión de las causas del problema del cierre de balance energético, descartó que errores en mediciones de radiación neta y flujos de calor sensible del suelo son la principal razón de la falta de cierre ya que incluso con las correcciones y calibraciones de sensores, no es posible completar el balance. En vez de eso, el autor

apuntó a que las mayores fuentes de error se deben a que el sistema EC no cuantifica las contribuciones de los “eddies” de baja frecuencia (“eddies” más grandes). Esto no es un problema menor ya que las subestimaciones de los flujos turbulentos de calor sensible del aire (H) y calor latente (LE) pueden ser evidencia de que los flujos de CO₂ se están subestimando (Sakai *et al.*, 2001). Para superar este problema, se sugiere promediar los flujos turbulentos instantáneos en un intervalo de tiempo mayor para poder incluir a los “eddies” de baja frecuencia. La función “Ogive” se propuso como una prueba para verificar que todos los componentes de baja frecuencia se incluyan en el flujo turbulento medido por EC (Foken and Wichura, 1996; Foken *et al.*, 2004), así, mientras mayor sea el tiempo para promediar los flujos, es más probable medir los “eddies” de baja frecuencia”. Sin embargo, los investigadores mencionan que se debe tener especial cuidado en considerar periodos muy largos ya que los flujos están condicionados al ciclo diurno y se puede transgredir el supuesto de estacionariedad (Foken and Wichura, 1996; Foken *et al.*, 2004). En este estudio, se promediaron los flujos c/30 min que es lo que comúnmente se usa, sin un análisis previo sobre las contribuciones de los flujos de alta y baja frecuencia, por lo tanto, podría ser una fuente del error del cierre del balance de energía observado.

Los flujos respiratorios del suelo, usualmente, se relacionan con la temperatura cuando no hay restricciones hídricas y a la humedad del suelo en zonas áridas o semiáridas. En el primer caso, las condiciones de humedad son relativamente estables en el tiempo a diferencia del segundo, siendo la temperatura el principal factor que explica la variación en la respiración ecosistémica (Tang *et al.*, 2008). En el segundo caso, la disponibilidad hídrica del suelo condiciona la mayor o menor sensibilidad de los flujos de CO₂ a la temperatura (Q₁₀), siendo la humedad la variable más determinante del flujo respiratorio (Xu and Qi, 2001; Xu *et al.*, 2004). Si estos flujos se descomponen en respiración derivada de las raíces de las plantas y respiración derivada de la descomposición de materia orgánica, se observan distintos comportamientos estacionales en función de las variables ambientales mencionadas anteriormente. Por ejemplo, Akinremi *et al.* (1999) compararon la respiración de microorganismos del suelo y de raíces en condiciones de barbecho (sin cultivo) y en cultivo de cebada, observando que en periodos de sequía, la proporción de respiración de raíces aumentaba debido a la disminución de la actividad microbiana por la baja humedad del suelo, siendo este factor la principal variable que explica la variación de los flujos respiratorios. En este estudio, se esperó encontrar una relación exponencial de los flujos nocturnos de CO₂ en función de la temperatura, dado que existían condiciones de humedad constantes entorno a capacidad de campo del suelo, sin embargo, dada la alta dispersión de los datos c/ 30 min (resultantes del filtro de μ^*), durante todos los meses de medición, los flujos no se pudieron ajustar a esta relación (Figura 10).

Adicionalmente, existe amplia evidencia de la dependencia de la respiración a la disponibilidad de carbono. Tal es el caso en la investigación realizada por Xu y Baldocchi (2004), en pastizales anuales en clima mediterráneo, que encontraron una fuerte relación lineal entre la producción primaria (PP = fotosíntesis) y la respiración ecosistémica (RE = respiración de heterótrofos + respiración de autótrofos), indicando que este flujo de salida se explicaba más por la actividad fotosintética del dosel que por la temperatura. Una respuesta similar se encontró en cultivos de maíz y soya bajo riego (Suyker *et al.*, 2005)

observando que las variaciones estacionales de RE estaban fuertemente ligadas a la PP, y por la tanto, al índice de área foliar de los cultivos. Franck *et al.* (2011), encontraron que la respiración de raíces, en viñas bajo riego, dependía de la disponibilidad de asimilados, reflejándose en bajos Q_{10} cuando este factor se limitaba. En un estudio de respiración de suelo (R_s = respiración de raíces de las plantas + respiración de heterótrofos del suelo) y ecosistémica (RE) en bosques (Janssens *et al.*, 2001), también se observó que la PP afectaba de forma importante a estas dos variables, opacando la dependencia a la temperatura. En este estudio, esta relación no se encontró a nivel diario ni a nivel estacional debido a que los flujos nocturnos de CO_2 se mantuvieron en torno a un mismo valor ($-3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) durante todos los meses de medición con el sistema EC (Figura 13), a pesar de la alta actividad fotosintética del cultivo durante enero y febrero (con IAF cercano a 5) y la consiguiente disminución a fines de marzo y en adelante, por el comienzo de la senescencia de las hojas en marzo.

Los valores de respiración ecosistémica nocturna observados en este trabajo fueron muy bajos en comparación a los mostrados en los estudios de Spano *et al.* (2004, 2008) de flujos de carbono medidos con el sistema EC en *Vitis vinifera* L. cv. Sangiovese, conducido en espaldera, cercano a $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (en pinta). Tomando en cuenta la respiración por unidad de superficie foliar, Mullins *et al.* (1992) mencionaron que en hojas maduras en vid, la tasa de respiración puede ser entre $0,5$ y $1,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 25°C ; Palliotti *et al.* (2005) observaron, en pinta, que la tasa de respiración de hojas maduras puede ser de $0,59 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y $1,63 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a 10°C y 35°C , respectivamente. Estos valores referenciales sugieren que con sólo la respiración foliar por unidad de superficie de suelo (considerando un IAF cercano a 5) supera el valor observado de respiración ecosistémica. Por lo tanto, claramente se intuye un problema de subestimación de este flujo.

Retomando la respuesta de los flujos de CO_2 nocturnos a la temperatura encontrada en este estudio, otros ensayos han encontrado la misma dispersión de datos al analizar la respuesta $c/30$ min (Hollinger *et al.*, 1994; Ruppert *et al.*, 2006). Hollinger *et al.* (1994) dio dos posibles razones a la falta de ajuste a una relación exponencial. Primero, todos los componentes de la RE poseen distintas sensibilidades a las variaciones de temperatura (ejemplo, Tang *et al.*, 2008), siendo este problema solucionado al encontrar una relación con la media de los flujos de CO_2 de la noche entera. Esto es aplicado en la investigación de Ruppert *et al.* (2006), en donde pudo obtener un buen ajuste sólo después de haber agrupado los flujos de CO_2 $c/30$ min en rangos de temperatura, y calculando la media de los flujos para cada rango. Y segundo, el factor que contribuye a esta alta variabilidad de los flujos nocturnos puede relacionarse con las condiciones de estabilidad atmosférica en la noche, siendo el intercambio neto CO_2 explicado por otros procesos no turbulentos que, normalmente, no son consideradas en la mediciones de los flujos con EC al asumir estacionariedad y homogeneidad horizontal (Baldochi *et al.* 2003). Esta última razón, puede ser, quizás, la causa más importante de este problema.

Durante condiciones estables de la noche pueden ocurrir subestimaciones de los flujos medidos por la torre EC (Aubinet *et al.*, 2000) ya que no considera la presencia de flujos advectivos y la presencia de CO_2 almacenado (bajo la altura de medición de la torre EC)

por las estratificaciones del aire. Goulden *et al.* (1996) clasifican estas subestimaciones de los flujos nocturnos como errores sistemáticos selectivos, siendo importante el impacto en el intercambio neto del ecosistema estimado a largo plazo ya que podría interpretarse mal la capacidad de secuestro de CO₂ atmosférico por parte del ecosistema. Por ejemplo, un error nocturno de $-1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sumado en 12 horas nocturnas durante un año, equivalen a $1,8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ emitidos hacia la atmósfera. Para superar estas incertidumbres en las estimaciones, se han optado por utilizar filtros de datos nocturnos correspondientes a periodos de baja turbulencia (en base a μ^*) y reemplazarlos por datos modelados de una función “biológica”, como por ejemplo, el modelo exponencial de respiración en función de temperatura propuesto en este trabajo.

El filtro μ^* , consiste en escoger aquellos datos en donde no se observa una relación entre los flujos nocturnos de CO₂ y la turbulencia, para así poder aplicar una corrección basado en la respuesta ambiental de los organismos (Gu *et al.*, 2005). A pesar de ser ampliamente usada por la comunidad científica, es importante escoger cuidadosamente los valores umbrales de μ^* ya que tiende a aumentar la RE al utilizar altos umbrales de este parámetro, subestimando el intercambio neto diario de CO₂ e induciendo a errores significativos en la estimación del balance final de carbono (Anthoni *et al.*, 2004). También, Anthoni *et al.* (2004) reportan que a mayores valores de μ^* utilizado para filtrar, mayor es la cantidad de datos de flujos de CO₂ que se descartan, generando la necesidad de rellenar más espacios en la serie de tiempo, por lo que podrían aumentar los errores en la estimación de carbono. En este estudio, los espacios generados fueron mayores al aumentar el valor del umbral inferior del rango de μ^* , reflejado en el porcentaje de datos eliminados. Para disminuir el ruido creado por este filtro, Gu *et al.* (2005) implementó un método estadístico para determinar los umbrales del filtro de velocidad de fricción y Ruppert *et al.* (2006) propuso aplicar los criterios de Foken y Wichura (1996) para descartar los periodos nocturnos con baja calidad de datos, aumentando la cantidad de datos nocturnos para poder aplicar los métodos de llenado de espacios sin datos (Falge *et al.*, 2001). Ya que los datos resultantes del filtro μ^* en este estudio no presentaron relación con la temperatura, se optó por realizar interpolaciones lineales entre los datos adyacentes, pero en vista de la alta posibilidad de ocurrencia de flujos no turbulentos durante la noche, este método pudo ser una importante fuente de error en la estimación final de flujos nocturnos de CO₂.

Dado que el filtro μ^* como los métodos de llenado de espacios sin datos se basan en aproximaciones empíricas, pueden sufrir de altas incertezas. Por esta razón, se puede optar por un método de corrección alternativo basado en la conservación de la masa (Yi *et al.*, 2008). El balance de masa establece que el CO₂ producido o absorbido por fuentes o sumideros biológicos puede ser almacenado en el aire o removido por flujos advectivos. Por lo tanto, este método involucra mediciones directas de los términos de advección (horizontal y vertical) y de almacén de CO₂ bajo la altura de medición de la torre EC, además de las mediciones de los flujos turbulentos que sumados, estiman el intercambio neto de CO₂ del ecosistema. En el caso de este estudio, la única corrección que se pudo haber aplicado al flujo turbulento fue sumar el CO₂ almacenado medido sólo a la altura de los sensores de la torre EC, sin embargo, no se disponía con suficientes datos durante la noche para su implementación. Por otra parte, a pesar de contar con un terreno de

topografía plana y vegetación homogénea, condición que asegura que la advección horizontal sea descartable como algunos investigadores mencionan (ejemplo, Baldocchi *et al.*, 2003), otros autores mencionan que puede darse este tipo de transporte no turbulento (Aubinet *et al.*, 2010), por lo tanto, es una posible razón que explica las subestimaciones de CO₂ que estarían dándose en este estudio. Según Yi *et al.* (2008), la ventaja de esta corrección es que se basa en mecanismos aerodinámicos y no muestra correlación con los factores conductores de la actividad biológica. El problema es que las mediciones directas de los componentes del balance de masa son altamente inciertas por la dificultad de medir pequeños gradientes de CO₂ en el contexto de la alta variabilidad espacial y temporal (Aubinet *et al.*, 2010). A pesar de que algunos investigadores opten por esta vía de corrección de los flujos, no hay razón para escoger entre este método o la corrección basada en umbrales de μ^* , ya que ambos pueden introducir potenciales errores en la estimación final del balance de carbono, como fue observado en los resultados de Yi *et al.* (2008).

Ya que la turbulencia en las horas del día es generada tanto por el aumento de la velocidad de fricción del viento como por el calentamiento de la superficie generando flujos de calor sensible del aire positivos, es poco probable encontrar que los flujos diurnos de CO₂ presenten los mismos problemas que los nocturnos por las razones explicadas anteriormente, a pesar de no haber medido advecciones ni almacén de CO₂ en todo el periodo de medición.

Las condiciones atmosféricas durante el día permitieron observar, mediante el método EC, las dinámicas de los flujos de CO₂ y las relaciones con variables ambientales, siendo la radiación global (R_{gi}) aquella que explica mejor la variación de los flujos diurnos de CO₂ (Figura 16). Por otra parte, al analizar la relación entre R_{gi} y los flujos de CO₂, se pudo observar que la pendiente de la regresión, equivalente a la eficiencia de uso de la radiación del ecosistema, disminuía hacia el final de la temporada, principalmente, por la disminución del IAF y de la capacidad fotosintética de las hojas.

En este estudio, se obtuvo valores de eficiencia del uso de la radiación (EUR) del ecosistema cercano a 1,02 g CO₂ MJ⁻¹ R_{gi} en el periodo de máxima cobertura del dosel (Figura 12). Este resultado difícilmente podría ser comparado con los valores encontrados en otras investigaciones, principalmente, porque las metodologías de estimación varían ya sea por la escala temporal-espacial utilizada o por los niveles de estudio del carbono (carbono fijado por el cultivo o carbono neto del ecosistema). Por ejemplo, Bradford *et al.* (2005) calcularon EUR a partir de la producción neta primaria (PNE), obteniendo valores en especies C3 cercano a 0,33 g C MJ⁻¹ PAR absorbido. En el caso específico de viñas, Bindi *et al.* (1997) y Castelan (2001) obtuvieron EUR entre 0,7-1 g MS MJ⁻¹ R_{gi}, indicando una mayor eficiencia comparado con este estudio. Sin embargo, la EUR calculada en el presente trabajo considera los flujos netos del ecosistema, por lo que los valores de salida de carbono, dados por la respiración de heterótrofos (R_h), estarían influyendo en este resultado.

El carbono diario fijado en el periodo de máxima cobertura foliar fue de 6,5 g C m⁻² día⁻¹, en promedio, a diferencia de otras investigaciones en vides, donde se midieron flujos de

CO₂ usando el sistema EC, que variaron en torno a 2-4 g C m⁻² día⁻¹ y que presentaban una interceptación de radiación menor (Spano *et al.*, 2004; Nardino *et al.*, 2007; Spano *et al.*, 2008). Cabe mencionar que si se corrigiera el valor de carbono diario fijado por una interceptación de radiación cercana a 95% en las investigaciones nombradas anteriormente, se alcanzarían valores similares a la media obtenida en este estudio, confirmando que la interceptación de radiación afecta directamente a los flujos de entrada de carbono al sistema. Por otra parte, se debe considerar que en este periodo los flujos máximos de carbono durante el día alcanzaron mayores valores de fijación (20-25 μmol m⁻² s⁻¹, Figura 13) que los estudios mencionado anteriormente (5-15 μmol m⁻² s⁻¹), pudiéndose atribuirse tanto a condiciones del estado hídrico de las plantas como a su manejo agronómico (ejemplo, manejo de la carga frutal, área foliar).

Anthoni *et al.* (2004) reportan que en la agricultura el intercambio neto de CO₂ dependerá en gran parte por la distribución y el periodo del crecimiento del cultivo en el año, por lo que la fecha de brotación en el caso de los frutales, será crucial para maximizar el uso de la radiación dependiendo de la ubicación del campo. A pesar de que no se pudieron medir los flujos de carbono durante todos los estados fenológicos de la vid, estudios muestran que las salidas de carbono del sistema ocurren, principalmente, al inicio de la temporada, en pleno crecimiento de brotes y raíces, en donde el proceso de respiración toma un rol importante (Pallioti *et al.*, 2004; Pallioti *et al.*, 2005; Lakso *et al.*, 2008), y en la cosecha de la fruta, en donde se extrae el carbono del sistema, traducido en biomasa; mientras que las entradas de carbono se producen cuando el cultivo ha alcanzado su máximo desarrollo foliar, en donde el proceso de la fotosíntesis toma relevancia (Lakso *et al.*, 2008), observándose en los resultados de enero y febrero de este estudio (Figura 13).

Muchas investigaciones han tratado de realizar verificaciones del carbono acumulado en un ecosistema comparando los valores de producción neta ecosistémica (PNE = fotosíntesis - RE) con los de intercambio neto ecosistémico (INE). Estas comparaciones la realizan asumiendo que PNE e INE son similares en magnitudes, cuando otros flujos de carbono distintos a fotosíntesis y respiración ecosistémica, como por ejemplo, los flujos no respiratorios derivado de la combustión de combustibles fósiles, son muy pequeños (Chapin III *et al.*, 2006). Como se ha hecho en este estudio, el INE puede estimarse mediante el sistema EC, mientras que PNE puede realizarse midiendo los componentes de la producción neta primaria (PNP = fotosíntesis - respiración de autótrofos) y la respiración de heterótrofos (Rh) a partir de la respiración de suelo (Rs). El problema, según Clark *et al.* (2001), es que la falta de mediciones directas de PNP y la falta de replicados en el espacio y tiempo puede derivarse en subestimaciones de PNP. Por otra parte, también los mismos autores comentan que es difícil la cuantificación de Rh con la suficiente precisión espacial para realizar, finalmente, la comparación entre el INE y PNE.

Adicionalmente, se pueden encontrar diferencias entre las comparaciones de INE y PNE dependiendo de la escala de tiempo en que se realizan las mediciones y del tipo de vegetación que compone el ecosistema. Por ejemplo, una investigación realizado para estimar el balance de carbono en una estepa natural (Belelli-Marchesini *et al.*, 2007), comparó los valores de PNE, mediante mediciones biométricas y de Rh del suelo, con las

de INE, medidos mediante el sistema EC, en una temporada de crecimiento de la vegetación del ecosistema, observando que los flujos acumulados de carbono obtenido por INE convergieron con los de PNE. En contraste, investigaciones realizadas en bosques difícilmente encontraron magnitudes similares entre PNE e INE en un año (Barford *et al.*, 2001; Curtis *et al.*, 2002; Gough *et al.*, 2008). En el estudio realizado por Gough *et al.* (2008), sólo se pudo encontrar una convergencia en los valores después de 5 años de mediciones, encontrando diferencias de 1% entre las estimaciones de INE y PNE. Estas diferencias las atribuyeron por el desfase temporal entre la fotosíntesis del dosel en la temporada y el carbono trasladado al crecimiento del árbol en la primavera siguiente (Barford *et al.*, 2001; Gough *et al.*, 2008). También, ellos mencionan que se debe considerar que la fotosíntesis responde instantáneamente a condiciones ambientales, no así el crecimiento, que puede ser afectado después de unas semanas o incluso un año. Por lo tanto, en ecosistemas que presentan vegetación leñosa, como en el caso de este estudio, la validación cruzada entre mediciones de EC y biométricas es posible hacerlo sólo en el largo plazo.

En este estudio, se propuso comparar las mediciones biométricas de carbono con los flujos medidos por el sistema EC, asumiendo que las magnitudes de INE y PNE eran similares en el periodo propuesto. Al comparar las tasas de acumulación de carbono, se observó un claro desajuste entre las estimaciones biométricas y las del sistema EC (Cuadro 7), no obstante, al comparar el carbono total acumulado en un periodo definido entre el 6 de enero y 8 de febrero, existió una diferencia de un 10 % aproximadamente en la estimación de ambos métodos (Cuadro 8).

Específicamente, la tasa de acumulación de carbono medido por EC subestimó la tasa estimada por la biomasa medida en racimos. Esto pudo deberse a errores en el tamaño de muestra de racimos, no obstante, al comparar el rendimiento estimado a partir de la biomasa medida y los datos de rendimiento del huerto, estos resultaron ser muy similares (Cuadro 9). También se observó que la tasa de acumulación de carbono estimado en brotes, después de cosecha, fue mucho menor a lo medido por EC en ese momento, posiblemente por el destino de los fotoasimilados hacia la acumulación de reservas en tronco, cargadores y raíces (Williams, 1996; Vivin *et al.*, 2002; Bennett *et al.*, 2005) o por un crecimiento tardío de raíces, como se ha observado en regiones cálidas (Bates *et al.* 2002). Es necesario mencionar que la mayoría de las hojas se mantuvieron fotosintéticamente activas por un mes y medio, aproximadamente, después de la cosecha de febrero, pudiendo justificar cualquiera de los dos procesos señalados anteriormente. Entonces, la explicación más razonable para entender las diferencias encontradas en las tasas de acumulación de carbono pudo ser el desfase temporal del crecimiento con la fotosíntesis, discutido por Barford *et al.*, (2001) y Gough *et al.* (2008).

Aunque la diferencia encontrada, entre las estimaciones de carbono total acumulado en el periodo de comparación, fue menor, se debe tener especial cuidado en su interpretación ya que el valor estimado por biometría representa sólo un porcentaje de la diferencia entre la fotosíntesis y la respiración por autótrofos (contenido de carbono en racimos y brotes) y, el

valor estimado por el sistema EC, considera la diferencia entre la fotosíntesis y la respiración del ecosistema que, incluye la respiración por heterótrofos.

Cabe destacar que, durante la investigación sólo se realizó el seguimiento de la biomasa de dos componentes de la planta en la temporada de producción. No se midió la dinámica de la biomasa de tronco, cargadores y raíces en la temporada, pudiendo haber influenciado en el peso final de los componentes de la planta medidos, debido a los procesos de traslocación y/o movilización de asimilados desde fuentes a sumideros, tal como se explica en otras investigaciones (Goldschmidt and Lakso, 2005; Holzapfel *et al.*, 2010), en donde la oferta de carbono para un sumidero puede provenir tanto de la fotosíntesis actual como del carbono de reserva. Por ejemplo, en el inicio de la temporada, las reservas de carbono, acumulados en la temporada anterior, pudieron aportar al crecimiento inicial de brotes, como fue observado en otros estudios en vid (Williams, 1996; Bates *et al.* 2002; Vivin *et al.*, 2002; Goffinet, 2004; Zapata *et al.*, 2004).

Mota *et al.* (2010) observaron, a través de la producción de biomasa anual, que el cultivo de uva de mesa, con una densidad de plantación de 816 plantas ha^{-1} , tuvo una fijación de carbono total (raíces, ramas, troncos, frutos, hojas) del orden de 6,3 kg C planta $^{-1}$ y a nivel de frutos, de 3,2 kg C planta $^{-1}$ (cercano al 50% del total de carbono fijado anual de la planta). Esta relación de partición de la fijación anual también se ha observado en otros cultivares de vid (Mullins *et al.*, 1992; Williams, 1996), por lo que se sugiere dejar los restos de poda y restos de los racimos en el suelo de las viñas para maximizar el potencial secuestro de carbono en el sistema (Smart *et al.*, 2010). A diferencia de las investigaciones mencionadas, en este estudio no se obtuvo la misma proporción en la partición de carbono en la planta, en donde la cantidad carbono estimado al final de la temporada en racimos fue aproximadamente de 2,2 kg C planta $^{-1}$ y en brotes, 2,6 kg C planta $^{-1}$, sin considerar el aporte de tronco, cargadores y raíces en el crecimiento anual vegetativo. Cabe considerar que, a pesar de que el huerto se manejó con menos racimos por planta comparado con un huerto ideal en Thompson Seedless (cercano a 38-45 racimos planta $^{-1}$, con 1.000-1.200 plantas ha^{-1}), la densidad de plantación de 1.632 plantas ha^{-1} compensó esto, alcanzando altos rendimientos.

Al final de la temporada 2011-2012, se evaluó el balance por medio de la metodología EC, resultando ser el cultivo un sumidero del carbono atmosférico (Figura 15) al acumular 3,9 t C ha^{-1} durante el periodo de evaluación, aunque este valor no considera lo consumido y producido al inicio de la temporada (desde septiembre hasta diciembre), cuando no existía un desarrollo foliar completo. Si a este balance se le descuenta el carbono contenido en frutos, retirados del ecosistema al cosechar, correspondiente a 3,6 t C ha^{-1} de acuerdo a la estimación del rendimiento del huerto, resultaría en una acumulación de 0,3 t C ha^{-1} entre los meses de enero y mayo de 2012. Por otra parte, el carbono contenido en frutos caídos (valor no cuantificado) y en los restos de poda (1,4 t C ha^{-1}) fue incorporado al suelo, aportando al “pool” de carbono del suelo en el periodo de medición.

Anthoni *et al.* (2004) mencionan que el balance anual de carbono y los patrones estacionales de los flujos de CO₂ pueden variar fuertemente en un mismo campo año tras

año como también por el tipo de cultivo. Por esto, es recomendable realizar estudios de balance de carbono al largo plazo para evaluar la variabilidad de la fijación de carbono atmosférico en el tiempo y verificar su capacidad para secuestrar carbono. Nunca se había evaluado un balance de carbono en forma continua por tanto tiempo en viñas (Spano *et al.*, 2004; Spano *et al.*, 2008) y, por esta razón, este estudio será importante para futuras investigaciones en el rubro, a pesar de no haber estimado el balance anual, considerando la importancia que toma cada día la cuantificación de la huella del carbono en la agricultura.

CONCLUSIONES

Al no poder cuantificar los flujos de carbono al inicio de la temporada de crecimiento no es posible estimar el balance anual de carbono en uva de mesa cv. Thompson Seedless, utilizando el método “Eddy covariance” ni probar la hipótesis planteada. Por lo tanto, es necesario replantear la hipótesis en una investigación futura, verificando los flujos de carbono dominantes en este agroecosistema. Para realizar esto, se debe evaluar la factibilidad de realizar el balance de carbono en un periodo superior a un año para poder cumplir las validaciones de la estimaciones de carbono acumulado mediante “Eddy covariance” a través de biometría y además, implementar un sistema para cuantificar respiración de heterótrofos.

Aunque la comunidad científica acepta la metodología “Eddy covariance” como la más precisa y confiable para estimar balances de carbono, se debe tomar en cuenta las desventajas que presenta por las subestimaciones de los flujos nocturnos de CO₂ y por las fallas del cierre de balance de energía.

El cierre de balance de energía durante el periodo de máxima cobertura foliar, en condiciones de inestabilidad atmosférica del día, aumenta la confiabilidad de las estimaciones de los flujos netos de CO₂ mediante la metodología “Eddy Covariance”. Sin embargo, durante el periodo nocturno, el cierre de energía es mucho menor por la falta de turbulencia generada por el viento.

Los flujos de salida de carbono en este sistema no se explican por las variaciones de humedad del suelo ni por las temperaturas del aire y suelo, dada la alta dispersión de los flujos nocturnos de CO₂ al relacionarlo con estas variables. Esto puede deberse por la presencia de transportes no turbulentos, los cuales no pueden ser cuantificados mediante una sola torre EC. Por lo tanto, para mejorar la estimación de los flujos nocturnos se podría implementar un sistema de medición de flujos con múltiples torres EC y sensores a distintas alturas de cada torre para cuantificar estos procesos en un volumen de control conocido. También, se propone implementar una validación de los flujos turbulentos nocturnos con un sistema de cámaras para medir respiración de suelo, de manera de verificar que no hay otros procesos interfiriendo con las mediciones de la torre EC.

Los flujos de entrada de carbono al sistema se explican por la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y por la actividad fotosintética de las hojas. Dentro del periodo que fue posible medir los flujos de CO₂ mediante EC, se observaron los máximos valores de entrada cuando existió máxima cobertura foliar y cuando se alcanzó la mayor la radiación global en la temporada. Los flujos mínimos de entrada se observaron en el periodo de senescencia foliar, coincidente con la menor disponibilidad de radiación global.

BIBLIOGRAFÍA

- Akinremi, O., S. McGinn and H. McLean. 1999. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in barley and fallow plots. *Canadian Journal of Soil Science* 79: 5-13.
- Anthoni, P., A. Knohl, C. Rebmann, A. Freibauer, M. Mund, W. Ziegler, O. Kolle and E.-D. Schulze. 2004. Forest and agricultural land-use-dependent CO₂ exchange in Thuringia, Germany. *Global Change Biology* 10: 2005-2019.
- Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, Ü Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A. Kowalski, P. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. Elbers, A. Granier, T. Grunwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini and T. Vesala. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research* 30: 113-175.
- Aubinet, M., C. Feigenwinter, B. Heinesch, C. Bernhofer, E. Canepa, A. Lindroth, L. Montagnani, C. Rebmann, P. Sedlak, E. Van Gorsel. 2010. Direct advection measurements do not help to solve the night-time CO₂ closure problem: Evidence from three different forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 655-664.
- Baldocchi, D. 2003. Assessing the eddy-covariance technique for evaluating the carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biology* 9: 479-492.
- Barford, C., S. Wofsy, M. Goulden, J. Munger, E. Pyle, S. Urbanski, L. Hutyyra, S. Saleska, D. Fitzjarrald, and K. Moore. 2001. Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. *Science* 294: 1688-1691.
- Bates, T., R. Dunst and P. Joy. 2002. Seasonal dry matter, starch, and nutrient distribution in 'Concord' grapevine roots. *HortScience* 37:313-316.
- Belelli-Marchesini, L., D. Papale, M. Reichstein, N. Vuichard, N. Tchebakova and R. Valentini. 2007. Carbon balance assessment of a natural steppe of southern Siberia by multiple constraint approach. *Biogeosciences* 4: 581-595.
- Bennett, J., P. Jarvis, G. Creasy and M. Trought. 2005. Influence of defoliation on overwintering carbohydrate reserves, return bloom, and yield of mature Chardonnay grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 56: 386-393.
- Bindi, M., F. Miglietta, B. Gozzini, S. Orlandini and L. Seghi. 1997. A simple model for simulation of growth and development in grapevine (*Vitis vinifera* L.). I. Model description. *Vitis* 36 (2): 67-71.

Bradford, J., J. Hicke and W. Lauenroth. 2005. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. *Remote Sensing of Environment* 96: 246-255.

Bravo, J. 2010. Mercado de la uva de mesa. Publicación de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias – ODEPA, Ministerio de Agricultura de Chile. 15p.

Bravo, J. 2011. El Mercado de fruta fresca 2010. Publicación de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias – ODEPA, Ministerio de Agricultura de Chile. 13p.

Burba, G. and D. Anderson. 2010. A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications. LI-COR, Inc. Lincoln, EUA. 214p.

Carbonneau, A., E. Lebon, H. Mabrouk and H. Sinoquet. 2000. Interactions “canopy shape x vigour level”: consequences on architecture and microclimate of the grapevine. *Acta Horticulturae* 525: 91-105.

Castelan, M. 2001. Growth and dry matter allocation in field-grown grapevine (*Vitis vinifera* L.): radiation use efficiency and energetic costs. PhD Tesis, INA Paris-Grignon, Francia, 121p. Disponible en: <<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=14196405>> Leído el 20 de noviembre de 2012.

Chapin III, F., G. Woodwell, J. Randerson, G. Lovett, E. Rastetter, D. Baldocchi, D. Clark, M. Harmon, D. Schimel, R. Valentini, C. Wirth, J. Aber, J. Cole, M. Goulden, J. Harden, M. Heimann, R. Howarth, P. Matson, A. McGuire, J. Melillo, H. Mooney, J. Neff, R. Houghton, M. Pace, M. Ryan, S. Running, O. Sala, W. Schlesinger, E. Schulze. 2006. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methodology. *Ecosystems* 9: 1041-1050.

Clark, D., S. Brown, D. Kicklighter, J. Chambers, J. Thomlinson and J. Ni. 2001. Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Ecological Applications* 11: 356-370.

Curtis, P., P. Hanson, P. Bolstad, C. Barford, J. Randolph, H. Schmid and K. Wilson. 2002. Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests, *Agricultural and Forest Meteorology* 113: 3-19.

Falge, E., D. Baldocchi, R. Olson, P. Anthoni, M. Aubinet, C. Bernhofer, G. Burba, R. Ceulemans, R. Clement, H. Dolman, A. Granier, P. Gross, T. Grunwald, D. Hollinger, N. Jensen, G. Katul, P. Keronen, A. Kowalski, C. Lai, B. Law, T. Meyers, H. Moncrieff, E. Moors, J. Munger, K. Pilegaard, U. Rannik, C. Rebmann, A. Suyker, J. Tenhunen, K. Tu, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson and S. Wofsy. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 43-69.

- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, Roma. 73p.
- Foken, T. 2008. The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications* 18: 1351-1367.
- Foken, T. and B. Wichura. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 78: 83-105.
- Foken, T., M. Gockede, M. Mauder, L. Mahrt, B. D. Amiro and J. W. Munger. 2004. Post-field quality control. pp. 181-208. In: Lee, X., Massman, W. and B. Law (Eds): *Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurements*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Franck, N., J. Morales, D. Arancibia-Avenidaño, V. García de Cortázar, J. Perez-Quezada, A. Zurita-Silva and C. Pastenes. 2011. Seasonal fluctuations in *Vitis vinifera* root respiration in the field. *New Phytologist* 192(4): 939-951.
- Franssen H., R. Stöckli, I. Lehner, E. Rotenberg and S. Seneviratne. 2010. Energy balance closure of eddy-covariance data: A multisite analysis for European FLUXNET stations. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1553-1567.
- García de Cortázar, V., C. Cordova and M. Pinto. 2005. Canopy structure and photosynthesis modelling of grapevines (*Vitis vinifera* L. cv. Sultana) grown on a overhead (*parronal*) trellis system in Chile. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 11 (3): 328-338.
- Goffinet, M.. 2004. Relation of applied crop stress to inflorescence development, shoot growth characteristics, and cane starch reserves in 'Concord' grapevine. *Acta Horticulturae* 640:189-200.
- Goldschmidt, E. and A. Lakso. 2005. Fruit tree models: scope and limitations. In: *Information and Communication Technology (ICT) Development and Adoption: Perspectives of Technological Innovation*, (E. Gelb, A. Offer, eds.), European Federation for Information Technologies in Agriculture, Food and the Environment. Disponible en: <<http://www.departments.agri.huji.ac.il/economics/gelb-fruit-8.pdf>> Leído el 20 de agosto de 2012.
- Gough, C., C. Vogel, H. Schmid, H. Su and P. Curtis. 2008. Multi-year convergence of biometric and meteorological estimates of forest carbon storage. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 158-170.
- Goulden, M., J. Munger, S. Fan, B. Daube and S. Wofsy. 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology* 2: 169-182.

Gu, L., E. Falge, T. Boden, D. Baldocchi, T. Black, S. Saleska, T. Suni, S. Verma, T. Vesala, S. Wofsy and L. Xu. 2005. Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering. *Agricultural and Forest Meteorology* 128: 179-197.

Heilman, J., K. McInnes, R. Gesch, R. Lascano and M. Savage. 1996. Effects of trellising on the energy balance of a vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology* 81: 79-93.

Hollinger, D., F. Kelliher, J. Byers, J. Hunt, T. McSeveny and P. Weir. 1994. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology* 75: 134-150.

Holzappel, B., J. Smith, S. Field and W. Hardie. 2010. Dynamics of carbohydrate reserves in cultivated grapevines. *Horticultural Reviews* 37: 143–211. Disponible en: <<http://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=IOmys0frsz0C&oi=fnd&pg=PA143&dq=Dynamics+of+carbohydrate+reserves+in+cultivated+grapevines&ots=qX9gbJP3ye&sig=0LJzNaubgWS2k6IjIK7oxYwqL-g#v=onepage&q=Dynamics%20of%20carbohydrate%20reserves%20in%20cultivated%20grapevines&f=false>> Leído el 10 de agosto de 2012.

Janssens, I., H. Lankreijer, G. Matteucci, A. Kowalsi, N. Buchmann, D. Epron, K. Pilegaard, W. Kutsch, B. Longdoz, T. Grünwald, L. Montagnani, S. Dore, C. Rebmann, E. Moors, A. Grelle, Ü. Rannik, K. Morgenstern, S. Oltchev, R. Clement, J. Gudmundsson, S. Minerbi, P. Berbigier, A. Ibrom, J. Moncrieff, M. Aubinet, C. Bernhofer, O. Jensen, T. Vesala, A. Granier, E.-. Schulze, A. Lindroth, A. Dolman, P. Jarvis, R. Ceulemans and R. Valentini. 2001. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology* 7: 269-278.

Kljun, N., P. Calanca, M. W. Rotach and H. P. Schmid. 2004. A simple parameterization for flux footprint predictions. *Boundary Layer Meteorology* 112: 503-523.

Lakso, A.N., Intrigliolo, D. and Eissenstat, D.M. 2008. Modeling Concord grapes with "Vitisim", a simplified carbon balance model: understanding pruning effects. *Acta Horticulturae* 803: 243-250.

Milthorpe, F. and J. Moorby. 1979. *An introduction to crop physiology*. 2ed. Cambridge. Cambridge University Press. 244 p.

Mota, C., C. Alcaraz-López, M. Iglesias, M. Martínez-Ballesta y M. Carvajal. 2010. Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia. Departamento de Nutrición vegetal, CEBAS-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Murcia, España. 41p. Disponible en: <http://www.lessco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_espanol.pdf> Leído el 30 de marzo de 2011.

Mullins, M., A. Bouquet and L. Williams. 1992. *Biology of the grapevine*. Mullins MG, editor. Cambridge: Cambridge University Press. 239 p.

- Nardino, M., Facini, O., Georgiadis, T. and Rossi, F. 2007. Canopy observations of a table grape vineyard: radiation balance, energy partitioning and CO₂ fluxes. *Acta Horticulturae* 732:611-615.
- Orlandini, S., A. Marta and G.Matti. 2008. Analysis and agrometeorological modelling of grapevine responses to different trellising systems. *Vitis* 47: 89-96.
- Pallioti, A., A. Cartechini, L. Nasini, O. Silvestroni, S. Mattioli and D. Neri. 2004. Seasonal carbon balance of 'Sangiovese' grapevines grown in two different central Italy environments. *Acta Horticulturae* 652:183-190.
- Pallioti, A., A., Cartechini, O.Silvestroni and S. Mattioli. 2005. Respiration activity in different above-ground organs of *Vitis vinifera* L. In response to temperature and developmental stage. *Acta Horticulturae* 689:159-166.
- PRO-CHILE. Bonos de Carbono. Disponible en: <http://www.prochile.cl/servicios/medioambiente/bonos_de_carbono.php> Leído el 20 de julio de 2010.
- Rojas, C., R. Opitz, A. Guerrero y A. Gutierrez. 2010. Evolución de las exportaciones silvoagropecuarias de Chile a sus socios comerciales, 2000 a junio de 2010. Publicación de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias-ODEPA, Ministerio de Agricultura, Chile. 65 p.
- Romero, A. 2010. Nuevas tendencias de Mercado: Huella de carbono y huella del agua. In: ProChile, Seminario sobre la huella de carbono y agua. Coquimbo, Chile, 10 de junio de 20 de junio de 2010. Disponible en: <<http://www.prochile.cl/coquimbo/noticias.php?item=00000011349>> Leído el 3 de marzo de 2011.
- Rossi, F., F. Nerozzi, O. Facini and T. Georgiadis. 1996. Orchard-atmosphere physical exchanges: modelling the thermal canopy regime for the determination of sensible and latent heat fluxes. *Acta Horticulturae* 416:169-176.
- Ruppert, J., M. Mauder, C. Thomas and J. Lüers. 2006. Innovative gapfilling strategy for annual sums of CO₂ net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* 138: 5-18.
- Sakai, R., D. Fitzjarrald and K. Moore. 2001. Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces. *Journal of Applied Meteorology* 40: 2178-2192.
- Smart, D., M. Wolff, E. Carlisle and M. del Mar Alsina, 2010. Reducing Greenhouse Gas Emissions in the Vineyard: Advances in the Search to Develop More Sustainable Practices. Proceedings of the EcoSostenibleWine Conference, Vilafranca de Penedes, Catalunya, España. pp.1-13.

Spano, D., C. Sirca, S. Marras, P. Duce, P. Zara, A. Arca and R. Snyder. 2008. Mass and energy flux measurements over grapevine using micrometeorological techniques. *Acta Horticulturae* 792: 623-629.

Spano, D., P. Duce and R. Snyder. 2004. Estimate of mass and energy fluxes over grapevine using eddy covariance technique. *Acta Horticulturae* 664: 631-638.

Suyker, A., S. Verma, G. Burba and T. Arkebauer. 2005. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. *Agricultural and Forest Meteorology* 131: 180-190.

Tang, J., P. Bolstad, A. Desai, J. Martin, B. Cook, K. Davis and E. Carey. 2008. Ecosystem respiration and its components in an old-growth forest in the Great Lakes region of the United States. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 171-185.

Twine, T., W. Kustas, J. Norman, D. Cook, P. Houser, T. Meyers, J. Prueger, P. Starks and M. Wesely. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* 103: 279-300.

Valenzuela y Lobato. 2000. Zona central. pp. 31-38. En: *Uva de mesa en Chile*, Colección Libros INIA N° 5. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.

van Dijk, A., A. Moene and H. de Bruin. 2004. The principles of surface flux physics: Theory, practice and description of the ECPack library. Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 99 pp.

Villagra, P. 2011. Estimación de los requerimientos hídricos y valores de kc de uva de mesa cv. Thompson seedless, conducida bajo parrón español, utilizando el método "eddy covariance". Tesis para optar al Título de Ingeniera Agrónoma y al grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias, Mención Producción Frutícola. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 45p.

Vivin, P., M. Castelan and J. Gaudillère. 2002. A source/sink model to simulate seasonal allocation of carbon in grapevine. *Acta Horticulturae* 584: 43-56.

Webb, E., G. Pearman and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106: 85-100.

Williams, L. 1996. Grape, p. 851-881. In: E. Zamski and A. Schaffer (eds.), *Photoassimilate distribution plants and crops: Source-sink relationships*. Marcel Dekker, New York.

Xu, L. and D. Baldocchi. 2004. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology* 123: 79-96.

Xu, L., D. Baldocchi and J. Tang. 2004. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biogeochemical Cycles* 18(4): GB4002. doi:10.1029/2004GB002281

Xu, M. and Y. Qi. 2001. Spatial and seasonal variations of Q₁₀ determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevadan forest. *Global Biogeochemical Cycles* 15 (3): 687-696.

Yi, C., D. Anderson, A. Turnipseed, S. Burns, J. Sparks, D. Stannard and R. Monson. 2008. The contribution of advective fluxes to net ecosystem exchange in a high-elevation, subalpine forest. *Ecological Applications* 18: 1379-1390.

Zapata C, E. Deléens, S. Chaillou and C. Magné. 2004. Partitioning and mobilization of starch and N reserves in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Plant Physiology* 161:1031-1040.