



UGR | Universidad
de Granada

Máster Geofísica y Meteorología
Septiembre 2013

EVALUACIÓN DE LA TRANSMISIVIDAD Y EL EFECTO DE DILUCIÓN EN SISTEMAS DE CÁMARAS DE MEDIDA DE INTERCAMBIOS DE CO₂ EN PLANTAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANA LÓPEZ BALLESTEROS

Dpto. de Física Aplicada

Grupo de Física de la Atmósfera

Tutora

Penélope Serrano Ortiz

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
OBJETIVOS.....	6
TEST DE TRANSMISIVIDAD	7
INTRODUCCIÓN	7
MATERIAL Y MÉTODOS	7
RESULTADOS	10
DISCUSIÓN.....	13
EFFECTO DE DILUCIÓN.....	15
INTRODUCCIÓN	15
MATERIAL Y MÉTODOS	17
RESULTADOS	19
DISCUSIÓN.....	23
CONCLUSIONES	25
AGRADECIMIENTOS	26
REFERENCIAS	27

LISTA DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

- A_n : flujo de asimilación neta corregido por el efecto de dilución ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- A'_n : flujo de asimilación neta no corregido por el efecto de dilución ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- $DPV = e_s - e_a$: Déficit de Presión de Vapor (kPa), equivale a la diferencia entre la presión de vapor en saturación y la presión de vapor existente.
- N : número total de moléculas que existe en un volumen dado a una presión y temperatura específicas.
- n_a : número de moléculas de un gas diluyente (vapor de agua) presentes en una mezcla de aire.
- n_i : número real de moléculas de un gas traza presentes en una mezcla de aire.
- n'_i : número virtual de moléculas de un gas traza presentes en una mezcla de aire.
- P : presión (Pa).
- R : constante universal de los gases ideales, equivale a $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- r_f : razón entre la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos medida con el sensor cubierto por el material plástico y la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos con el sensor descubierto (%).
- T : temperatura (K).
- T_p : flujo de transpiración de la planta monitorizada ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).
- V : Volumen (m^3).
- X_i : fracción molar referente a aire seco de un gas componente de una mezcla de gases.
- X'_i : fracción molar referente a aire húmedo de un gas componente de una mezcla de gases.
- X_d : fracción molar referente a aire húmedo de un gas diluyente que forma parte de una mezcla de gases (vapor de agua).
- \mathcal{E} : error debido al efecto de dilución.
- BNCE**: Balance Neto de Carbono del Ecosistema
- C**: Carbono
- CCT**: Cámara de Cierre Transitorio
- IRGA**: Analizador de gases en el infrarrojo (*InfraRed Gas Analyser*)
- PAR**: Flujo de radiación fotosintéticamente activa expresada en términos de densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos (*Photosynthetically Active Radiation*; $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

INTRODUCCIÓN GENERAL

El ciclo global de carbono (C) depende del balance entre los procesos que actúan como fuente y sumidero dentro de los diferentes subsistemas terrestres: atmósfera, biosfera, criosfera, hidrosfera y litosfera. Estos procesos ocurren a diferentes escalas de tiempo modificando la cantidad de C presente en los distintos reservorios que componen cada uno de estos subsistemas (Boucot y Gray, 2001). En las últimas décadas, el aumento de la cantidad de C presente en la atmósfera, provocado principalmente por las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂) y cambios en los usos de suelo, ha producido perturbaciones climáticas induciendo cambios en los regímenes de temperatura y precipitación globales (Molina, 2007; Keeling, 1960). El aumento anual en la concentración de CO₂ es sólo la mitad de lo esperado, lo que implica la existencia de procesos fisicoquímicos y biológicos de captación de CO₂ terrestre u oceánicos. En este aspecto, estudios isotópicos revelan que el intercambio de CO₂ entre el océano y la atmósfera no explica dicha captación, por lo que debe ser llevada a cabo fundamentalmente por sistemas terrestres (Schimel et al., 2001). Por lo tanto, es necesario conocer y entender detalladamente el funcionamiento de estos sistemas en relación al balance global de C para poder llevar a cabo la mitigación de los impactos provocados por el ser humano.

Existen diversas técnicas para medir el intercambio de CO₂ entre los sistemas terrestres y la atmósfera, las cuales pueden ser clasificadas en función del proceso estudiado y de la escala espacial que se considere.

En primer lugar, la **fotosíntesis a escala foliar** puede ser estimada a partir de medidas de intercambio gaseoso a escala de hoja mediante un sistema compuesto por una cámara que encierra la hoja y el volumen de aire muestreado, junto con un analizador de gases en el infrarrojo (IRGA) a partir del cual se calcula el flujo de asimilación neta de CO₂. Estas medidas son frecuentemente utilizadas para modelizar el intercambio gaseoso a escala de planta (Linderson et al., 2012; Moriana et al., 2002). Sin embargo, esta modelización (*scaling-up*) tiene deficiencias: es necesario un elevado número de muestras para conseguir buenos resultados, y los modelos no siempre incluyen parámetros fisiológicos por lo que no se ajustarían a la realidad (Niu et al., 2011; Pérez-Priego et al., 2010).

En segundo lugar, la **respiración del suelo** (flujos de CO₂ emitidos del suelo a la atmósfera) se corresponde con la suma de los procesos de descomposición de la materia orgánica presente en el suelo llevados a cabo por los microorganismos y la respiración de las raíces de las plantas (Janssens et al., 2003; Subke et al., 2006). Ambos procesos, que ocurren simultáneamente, están determinados por dos tipos de factores: abióticos (temperatura, humedad del suelo, cantidad de CO₂ en el aire) y bióticos (microbiota edáfica, crecimiento radicular) (Davidson et al., 1998; Granier et al., 2007; Janssens et al., 2003). Las técnicas que se utilizan para medir los flujos de CO₂ emitidos desde el suelo pueden agruparse en dos grupos. 1) Medidas continuas de la fracción molar de CO₂ a diferentes profundidades en un perfil de suelo (Sánchez-Cañete et al., 2013) y parámetros de difusividad gaseosa en el material edáfico mediante la aplicación de la Ley de Fick (Kabwe et al., 2002; Rayment y Jarvis, 1997). Sin embargo, diversos estudios han mostrado la dificultad en la caracterización de los parámetros de difusividad experimentalmente (Hutchinson y Livingston, 2002). 2) Medidas puntuales mediante el uso de cámaras de respiración de suelo. Estas constituyen la técnica más

utilizada debido a que permiten la medida directa y puntual de los flujos de respiración de suelo en collares (cilindros de PVC insertados permanentemente en el suelo normalmente con una superficie de 78.5 cm^2). Estas cámaras, pueden dividirse a su vez en cámaras estáticas y dinámicas. El funcionamiento de las cámaras estáticas se basa en la absorción pasiva de CO_2 mediante una solución alcalina a lo largo de 24 horas, siendo el método de menor precisión debido a las limitaciones que presenta el uso de materiales absorbentes (Steduto et al., 2002). Por otra parte, las cámaras dinámicas se componen de un IRGA portátil acoplado a una cámara que encierra el volumen de aire en el que se mide el intercambio gaseoso suelo-atmósfera; la instalación de ventiladores garantiza la mezcla de aire en el interior de la cámara durante los 2-3 minutos de medida. Este último método presenta claras ventajas con respecto a las cámaras estáticas siendo mayor la precisión y menor la perturbación del medio muestreado debido a un menor periodo de medida.

En tercer lugar, el intercambio de CO_2 entre la atmósfera, la vegetación y el suelo se mide mediante la técnica *Eddy Covariance* (EC) siendo la única herramienta que permite cuantificar directamente el **Balance Neto de Carbono de un Ecosistema** (BNCE) (Friend et al., 2007) mediante la medida, de forma continua, de flujos turbulentos próximos a la superficie, siendo necesaria la utilización de instrumentación con una alta frecuencia de muestreo (*i.e.* 10 Hz). La instalación de torres EC permite cuantificar los flujos de CO_2 , de calor sensible y calor latente a distintas escalas temporales, pudiéndose realizar una integración a escala anual o a más largo plazo del BNCE (Wofsy et al., 1993). No obstante, esta técnica no es suficiente cuando el objetivo es comprender y/o cuantificar los procesos implicados en el BCNE, que se corresponden con procesos de fijación de CO_2 (*i.e.* fotosíntesis) y de emisión de CO_2 a la atmósfera (respiración del ecosistema, R_{eco} , junto con otros procesos de carácter abiótico). En este sentido, las técnicas de partición permiten separar los procesos principales que intervienen en el BCNE (Lasslop et al., 2010; Reichstein et al., 2005), sin embargo, cuando existen fenómenos puntuales y poco estudiados como la ventilación subterránea (Kowalski et al., 2008; Sanchez-Cañete et al., 2011; Serrano-Ortiz et al., 2010), la aplicación de estas técnicas dan lugar a estimaciones erróneas (Pérez-Priego et al., 2013).

En cuarto lugar, la **estimación del BCNE a escala regional, continental o global** sólo es posible mediante la modelización de los flujos de CO_2 que intervienen en el mismo. Actualmente podemos clasificar los modelos en dos grupos: modelos dinámicos de vegetación global (*Dynamic Global Vegetation Models, DGVM*) y modelos basados en imágenes de satélite. Por una parte, los DGVM están diseñados para predecir la dinámica temporal de la vegetación en un amplio rango de escalas temporales y espaciales (Friend et al., 2007). Ejemplos de DGVM son el modelo dinámico de vegetación global Sheffield (SDGVM) (Woodward y Lomas, 2004; Woodward et al., 1995), el modelo de Lund-Postdam-Jena (LPJ) (Sitch et al., 2003) o el modelo ORCHIDEE (Krinner et al., 2005). Todos estos modelos se basan en el cálculo de los flujos de C en relación a la vegetación y su dependencia con las condiciones ambientales, por lo que los datos obtenidos con la técnica EC son utilizados para la validación, evaluación y/o parametrización de estos modelos. Por otra parte, los modelos basados en imágenes de satélite utilizan, en la mayoría de los casos, los productos de MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) y permiten estimar la Producción Primaria Bruta (*Gross Primary Production, GPP*) en base al algoritmo propuesto por Monteith (1972) y (Sellers, 1987), la Producción Primaria Neta (*Net Primary Production, NPP*) mediante el Modelo de Eficiencia en la Producción

(*Production Efficiency Model, PEM*) (Running et al., 2004) o el Intercambio Neto del Ecosistema (*Net Ecosystem Exchange, NEE*) mediante el Modelo de Fotosíntesis y Respiración de la Vegetación (*Vegetation Photosynthesis and Respiration Model, VPRM*) (Mahadevan et al., 2008), basado en índices espectrales derivados de imágenes de MODIS (*Enhanced Vegetation Index, EVI*, y *Land Surface Water Index, LSWI*), junto con datos de temperatura del aire y de radiación solar con una alta resolución temporal y espacial. Con respecto a este tipo de modelos, los datos obtenidos con torres EC se utilizan para la calibración y la validación de los mismos, e incluso, en el caso del modelo VPRM, estos datos son incorporados al modelo mediante la utilización de parámetros derivados de datos obtenidos con torres EC.

Hay procesos que intervienen en el BCNE que con las técnicas anteriormente descritas difícilmente podemos estudiar, como la respiración autotrófica que realizan las plantas y que está incluida en el término R_{eco} , o los diferentes comportamientos fisiológicos que caracterizan las especies vegetales que componen un ecosistema. Para poder caracterizar estos procesos es necesario medir los flujos de CO_2 a una escala diferente a las anteriormente mencionadas. Las medidas del intercambio gaseoso entre una sola planta y la atmósfera permiten estudiar estos procesos y por tanto, son una herramienta potencial para la modelización del BCNE a diferentes escalas espacio-temporales.

En este sentido, la asimilación y emisión de CO_2 (fotosíntesis y respiración, respectivamente) y la emisión de vapor de agua (transpiración) que realizan las plantas pueden medirse *in situ* mediante los sistemas de cámaras. En general, este tipo de técnica consiste en el registro, a alta frecuencia (i.e. 1 Hz), de las variaciones en la fracción molar de CO_2 y vapor de agua en un volumen determinado donde se encuentra la planta, mediante el uso de un IRGA. El valor de los flujos correspondientes a los procesos de fotosíntesis, transpiración o respiración, se calcula en base a estas variaciones, aplicando métodos de regresión lineal o polinómica (Breuninger et al., 2012). En la bibliografía podemos encontrar dos tipos de cámaras: cámaras de sistema continuo (Nie et al., 1992) y cámaras de cierre transitorio (CCT) (Pérez-Priego et al., 2010). Este último tipo presenta claras ventajas ya que las modificaciones sobre las condiciones ambientales en las que se encuentra la planta son menores. Por otra parte, la ventaja del uso de cámaras con respecto a las medidas a nivel foliar radica en que mediante el uso de cámaras podemos cuantificar los flujos de carbono y vapor de agua sin despreciar las estrategias fisiológicas de las especies muestreadas sin que sea necesario un alto número de muestras.

Los sistemas de cámaras son una técnica relativamente reciente, por lo que existen determinados aspectos metodológicos que aún están por definir y analizar. Existen trabajos que evalúan aspectos como la duración óptima de medida, método de cálculo (Graf et al., 2013; Langensiepen et al., 2012; Perez-Pena y J., 2004; Teitel et al., 2011) o las variaciones de las condiciones ambientales dentro de la cámara durante el tiempo de muestreo (Nie et al., 1992; Steduto et al., 2002). Sin embargo, hay otros aspectos, como la transmisividad del material con el que se construye la cámara o el efecto de dilución debido a la presencia de vapor de agua, que no han sido estudiados detalladamente en los trabajos citados anteriormente. En este trabajo se estudian estos dos aspectos mediante la evaluación de la transmisividad de dos materiales utilizados en la construcción de cámaras, y a través del análisis y la cuantificación del error de dilución en la aplicación de un sistema de cámaras de cierre transitorio para medir flujos de asimilación neta.

OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

I) Test de Transmisividad

1. Evaluar la transmisividad de dos materiales utilizados para la construcción de sistemas de cámaras para medir flujos de CO₂.
2. Determinar si el valor de la transmisividad es constante o presenta variaciones.
3. Determinar los factores de los que depende la variación de la transmisividad mediante la realización de varios tipos de medidas.

II) Efecto de Dilución

1. Definir el error de dilución.
2. Comprobar si estudios ya publicados incluyen corrección para el error de dilución.
3. Cuantificar el error de dilución en la utilización de sistemas de cámaras de cierre transitorio para medir flujos de CO₂.
4. Establecer relaciones entre este error y parámetros eco-fisiológicos y ambientales.

I. TEST TRANSMISIVIDAD

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se llevan a cabo una serie de experimentos con el objetivo de evaluar la variación de la densidad de flujo radiante en el rango de radiación fotosintéticamente activa (*Photosynthetically Active Radiation, PAR*), 400nm- 700nm, cuando atraviesa dos materiales diferentes utilizados para la construcción de sistemas de cámaras, tanto de cierre transitorio como de sistema continuo.

Los materiales utilizados son:

- a) **Llumar®** (Crystal Clear, Dupont Teijin Films, Hopewell, EEUU). Este material, en base las especificaciones del fabricante, tiene un grosor de 75 μm , un peso de 0.010 g cm^{-2} , una permeabilidad baja para CO_2 y vapor de agua, una adsorción baja para el vapor de agua, un 90% de transmisividad en el rango espectral PAR y es suficientemente resistente para su utilización en la intemperie durante medidas puntuales en campo. Se utiliza en la construcción de cámaras de cierre transitorio.
- b) **Plexiglas®** (Clear 0A000 GT, Evonik Industries, Darmstadt, Alemania). Este material presenta un grosor de 3 mm y un peso de 2.868 g cm^{-2} . Tiene una permeabilidad nula para CO_2 y vapor de agua, sin embargo, absorbe 38 mg de agua tras sumergir una lámina de material durante 24h a 23°C. Con respecto a las propiedades ópticas, el *plexiglas®* transmite un 92% de radiación solar y absorbe la mayoría de la radiación ultravioleta. Este material presenta una alta resistencia a impactos y roturas, y también se conserva en condiciones de intemperie presentando una baja tasa de degradación. Estas características hacen que éste sea uno de los materiales más utilizados en sistemas de cámaras continuos y cámaras de cierre transitorio (Chojnicki et al., 2010).

METODOLOGÍA

Instrumentación

Para ambos materiales descritos anteriormente se evalúa la transmisividad a la radiación PAR global y difusa mediante la utilización de dos sensores PAR (Li-190SB, Li-Cor, Lincoln, NE, EEUU), y un sistema de almacenamiento de datos o *datalogger* (CR3000, Campbell Scientific, Logan, UT, EEUU).

Este sensor está diseñado para medir PAR en una superficie plana y se constituye de un fotodiodo de silicón con una respuesta mejorada en la región visible del espectro. A continuación se muestra en la siguiente tabla las especificaciones técnicas del sensor.

Estabilidad	<±2% de cambio en un año
Tiempo de Respuesta	10 μs
Dependencia con la Temperatura	0.15% por °C máximo
Corrección de coseno	hasta un ángulo de incidencia de 80 °
Temperatura de funcionamiento	-40 a 65°C
Humedad relativa	0 a 100%
Tamaño	2.38 x 2.54 cm
Peso	28 g
Sensibilidad	5 μA per 1000 μmoles s ⁻¹ m ⁻²
Linealidad	Desviación máxima del 1% hasta 10000 μmoles s ⁻¹ m ⁻²

Tabla 1. Especificaciones técnicas del sensor PAR (Li-190SB, Li-Cor, Lincoln, NE, EEUU).

Diseño experimental

En primer lugar, se realizaron medidas simultáneas con ambos sensores para su intercomparación, tanto para la radiación PAR global (con predominancia de la radiación directa) como para radiación PAR difusa. Las ecuaciones resultantes se muestran a continuación.

PAR global:

$$y = 1.0008x - 9.0458$$

PAR difusa:

$$y = 0.9956x - 4.1543$$

siendo el valor de $R^2 = 0.99$ en ambos casos.

Posteriormente, se cubrió un sensor con el material a evaluar y el otro se dejó descubierto, realizándose varios tipos de medidas:

a) PAR global

En el caso de la PAR global, se estudia la variación de la transmisividad en función del ángulo cenital (θ) que se determina con referencia al normal de la superficie del material a evaluar y afecta en dos sentidos a la transmisión de la radiación (Fig.1a). Por un lado, la variación en el ángulo cenital conlleva una variación en el camino óptico que recorre la radiación cuando atraviesa el material y además, implica el cambio en las características de la radiación que traspasa dicho material, ya que cuando el ángulo cenital es mayor, la proporción de PAR difusa sobre PAR global aumenta. Con el objetivo de aislar este último efecto de la transmisividad total del material estudiado, se lleva a cabo el mismo experimento manteniendo constante el ángulo de incidencia de la radiación, siendo éste normal a la superficie para todas las medidas realizadas a lo largo de un día (Fig. 1b).

b) PAR difusa

Se realizan medidas de PAR difusa sombreando ambos sensores (Fig. 1c), el cubierto por el material plástico y el descubierto, durante 60 segundos para diferentes horas del día, con el objetivo de determinar si existe una variación en la transmisividad de PAR difusa cuando existe una variación de la razón PAR difusa/PAR global de la radiación incidente.

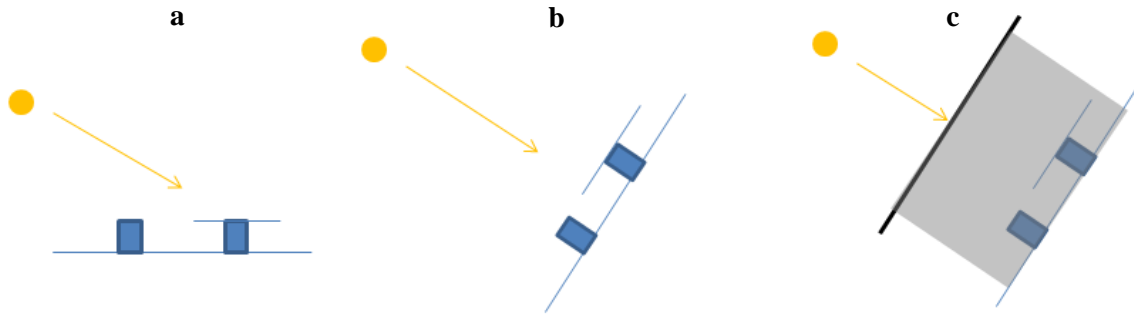


Figura 1. Esquema del diseño experimental llevado a cabo. **a)** Medidas de irradiancia PAR global para diferentes ángulos cenitales. **b)** Medidas de irradiancia PAR global normal a la superficie en diferentes momentos del día. **c)** Medida de irradiancia PAR difusa para diferentes momentos del día.

Con respecto a la estimación del ángulo cenital y de la masa óptica relativa (corregida por la presión) se han utilizado las ecuaciones propuestas por Spencer (1971) y Kasten (1965), que se muestran a continuación.

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega = \sin\alpha \quad (1)$$

$$m_r = \frac{1}{\cos\theta + 0.15(93.885 - \theta)^{-1.253}} \quad (2)$$

$$m_a = m_r \frac{p}{1013.25} \quad (3)$$

donde θ es el ángulo cenital, δ es la declinación solar, ϕ es la latitud, ω es el ángulo horario, α es la altura solar, m_r es la masa óptica relativa, p es la presión atmosférica en hPa y m_a es la masa óptica relativa corregida por la presión.

Los datos que se muestran en todas las tablas del apartado de resultados corresponden a promedios y desviaciones estándar de 60 medidas adquiridas a una frecuencia de 1 Hz. Las medidas se han realizado en condiciones de cielo despejado durante los días 25 de junio, 17 de julio y 30 de julio de 2013 en la terraza de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada (37° 11' 3" N, 3° 36' 6" O).

RESULTADOS

En primer lugar, se presentan los resultados del test para diferentes ángulos cenitales. Seguidamente, se muestran los resultados obtenidos en distintos momentos del día y por tanto, para diferentes valores de la razón PAR difusa/PARGlobal. Por último, se presentan los resultados para PAR difusa.

En todas estas tablas, se presentan los resultados en términos de razón entre la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos medida con el sensor cubierto por el material plástico y la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos con el sensor descubierto, expresada en términos de porcentaje (r_f).

$$r_f = \frac{PAR_{cubierto}}{PAR_{descubierto}} \times 100 \quad (4)$$

Hora solar	Ángulo cenital	Irradiancia PAR global LLumar®	Irradiancia PAR global	r_f (%)
12:15	13.8	1838 ± 4	2013 ± 5	91.321 ± 0.004
14:18	30.3	1661 ± 3	1820 ± 3	91.265 ± 0.004
15:38	45.5	1318 ± 4	1459 ± 5	90.315 ± 0.006
16:52	60	845 ± 5	954 ± 10	88.658 ± 0.014
18:09	75	349 ± 4	432 ± 5	80.632 ± 0.019

Tabla 2. Valores de irradiancia de radiación fotosintéticamente activa (PAR) global para los dos sensores utilizados, uno cubierto con LLumar® y el otro sin cubrir, y valores de la razón entre la irradiancia PAR medida con el sensor cubierto y aquella medida con el sensor descubierto (r_f) para diferentes ángulos cenitales, medidos durante el 25 de junio de 2013.

Hora solar	Ángulo cenital	Irradiancia PAR global Plexiglas®	Irradiancia PAR global	r_f (%)
12:18	16.1	1816 ± 3	1958 ± 4	92.709 ± 0.004
14:18	30.1	1602 ± 6	1779 ± 6	90.010 ± 0.006
15:36	45.0	1264 ± 2	1447 ± 2	87.324 ± 0.003
16:53	60.0	793 ± 5	969 ± 6	81.840 ± 0.010
18:07	75.0	292 ± 3	417 ± 4	69.878 ± 0.014

Tabla 3. Valores de irradiancia de radiación fotosintéticamente activa (PAR) global para los dos sensores utilizados, uno cubierto con Plexiglas® y el otro sin cubrir, y valores de la razón entre la irradiancia PAR medida con el sensor cubierto y aquella medida con el sensor descubierto (r_f) para diferentes ángulos cenitales, medidos durante el 30 de julio de 2013.

Como podemos observar en la tabla 2 y 3, los valores de r_f decrecen cuando el ángulo cenital aumenta, en ambos materiales. Cuando esto ocurre, el camino óptico recorrido por la radiación incidente es mayor, por lo que atenuación de PAR será mayor.

Sin embargo, en el caso del material *Plexiglas*®, la disminución en r_f es mayor, entorno a un 25% (24.6%), mientras que en el caso de *LLumar*® r_f se reduce aproximadamente en un 12% (11.7%), en promedio durante un día.

m_a	Irradiancia PAR global <i>LLumar</i> ®	Irradiancia PAR global	r_f (%)
1.04	1875 ± 5	2044 ± 5	91.729 ± 0.005
1.16	1854 ± 11	2016 ± 14	91.998 ± 0.012
1.43	1790 ± 5	1942 ± 4	92.170 ± 0.004
2.01	1549 ± 5	1676 ± 8	92.429 ± 0.007
3.83	1045 ± 5	1122 ± 8	93.070 ± 0.012

Tabla 4. Valores de irradiancia de radiación fotosintéticamente activa (PAR) global para los dos sensores utilizados, uno cubierto con el material *LLumar*® y el otro sin cubrir, y valores de la razón entre la irradiancia PAR medida con el sensor cubierto y aquella medida con el sensor descubierto (r_f) calculada en base a estos valores para un mismo ángulo de incidencia de 90° y diferentes valores de masa óptica relativa (m_a), medidos durante el 25 de junio de 2013.

m_a	Irradiancia PAR global <i>Plexiglas</i> ®	Irradiancia PAR global	r_f (%)
1.06	1919 ± 4	2019 ± 3	95.035 ± 0.004
1.15	1878 ± 7	1975 ± 9	95.078 ± 0.008
1.42	1833 ± 18	1937 ± 18	94.662 ± 0.018
1.99	1623 ± 3	1699 ± 4	95.511 ± 0.004
3.81	1170 ± 5	1212 ± 6	96.533 ± 0.009

Tabla 5. Valores de irradiancia de radiación fotosintéticamente activa (PAR) global para los dos sensores utilizados, uno cubierto con *Plexiglas*® y el otro sin cubrir, y valores de la razón entre la irradiancia PAR medida con el sensor cubierto y aquella medida con el sensor descubierto (r_f) calculada en base a estos valores; para un mismo ángulo de incidencia de 90° y diferentes valores de masa óptica relativa (m_a), medidos durante el 30 de julio de 2013.

En el caso del material *LLumar*®, hay una clara tendencia creciente en los valores de r_f cuando la proporción de radiación PAR difusa aumenta con respecto a la radiación PAR global, es decir, cuando la medida se realiza en momentos que presentan altos valores de masa óptica relativa (Tabla 4). En este caso, r_f es un 1.5% mayor cuando han transcurrido 7.5h desde el mediodía solar y por tanto, nos aproximamos a la hora del atardecer. No obstante, los valores obtenidos con *Plexiglas*® no muestran una tendencia tan clara, aunque sí podemos decir que es ligeramente creciente (Tabla 5). Sin embargo, los valores de r_f en el caso del *Plexiglas*® son superiores que los valores de r_f

obtenidos con el material *Llumar*®, por lo que la atenuación de la radiación PAR global con incidencia normal es mayor en el caso del *Llumar*®.

m_a	Irradiancia PAR difusa <i>LLumar</i> ®	Irradiancia PAR difusa	r_f (%)
1.04	253 ± 9	240 ± 12	105.12 ± 0.09
1.16	288 ± 8	275 ± 14	104.58 ± 0.08
1.43	313 ± 7	305 ± 5	102.52 ± 0.04
2.01	261 ± 7	255 ± 9	102.19 ± 0.06
3.83	150 ± 12	128 ± 11	117.43 ± 0.19

Tabla 6. Valores de irradiancia de radiación fotosintéticamente activa (PAR) difusa para los dos sensores utilizados, uno cubierto con el material *LLumar*® y el otro sin cubrir, y valores de la razón entre la irradiancia PAR medida con el sensor cubierto y aquella medida con el sensor descubierto (r_f) calculada en base a estos valores, para diferentes valores de masa óptica relativa (m_a), medidos durante el 25 de junio de 2013.

m_a	Irradiancia PAR difusa <i>Plexiglas</i> ®	Irradiancia PAR difusa	r_f (%)
1.06	188 ± 14	201 ± 14	93.43 ± 0.14
1.15	179 ± 15	189 ± 13	94.37 ± 0.14
1.42	181 ± 4	174 ± 10	104.07 ± 0.09
1.99	186 ± 15	183 ± 7	101.60 ± 0.12
3.81	83 ± 19	86 ± 2	97.24 ± 0.25

Tabla 7. Valores de irradiancia de radiación fotosintéticamente activa (PAR) para los dos sensores utilizados, uno cubierto con *Plexiglas*® y el otro sin cubrir, y valores de la razón entre la irradiancia PAR medida con el sensor cubierto y aquella medida con el sensor descubierto (r_f) calculada en base a estos valores, para diferentes valores de masa óptica relativa (m_a), medidos durante el 30 de julio de 2013.

Si observamos la tabla 6, podemos ver que los valores de r_f son superiores al 100% para todas las medidas, alcanzando el valor máximo cuando la masa óptica relativa es máxima. En este sentido, existe una relación directamente proporcional entre la irradiancia de PAR difusa y r_f en el caso del material *LLumar*®, aunque esta relación no es tan clara cuando m_a se encuentra entre 1 y 2. Por el contrario, no se puede realizar tal afirmación en el caso del material *Plexiglas*® puesto que los valores de r_f oscilan entre 93.4% y 104.1% sin presentar ninguna tendencia significativa.

DISCUSIÓN

En base a los resultados presentados anteriormente, el material *Llumar*® presenta ventajas con respecto al material *Plexiglas*®. Por una parte, la atenuación de la irradiancia PAR cuando el ángulo de incidencia disminuye (*i. e.* el ángulo cenital aumenta) es menor en *Llumar*® siendo esta característica importante en el caso de cámaras con morfología cúbica. Por otra parte, a pesar de la amplificación de la irradiancia PAR difusa en el caso del *Llumar*®, este efecto podría compensar la disminución en la radiación PAR directa, ya que las plantas utilizan de manera más eficiente la radiación difusa (Mercado et al., 2009). La única ventaja clara que presenta el material *Plexiglas*® con respecto a *Llumar*® es su alta resistencia en condiciones de intemperie, siendo más adecuado utilizar este material para sistemas de cámaras continuos que permanecen en los sitios experimentales durante períodos más largos.

Los factores principales que influyen en la selección de un material específico para la construcción de sistemas de cámaras son: permeabilidad para diferentes gases, características espectrales (absorbancia, transmisividad y reflectancia), tasa de degradación en intemperie (en el caso de sistemas de cámaras continuos), manejo práctico en campo (peso, resistencia), disponibilidad en el mercado y precio. En este sentido, una amplia variedad de materiales son usados en la construcción de cámaras, como por ejemplo cristal acrílico (Langensiepen et al., 2012), policarbonato transparente (Steduto et al., 2002), polietileno transparente de baja densidad (Corelli-Grappadelli, 1993), propileno etileno fluorado (Breuninger et al., 2012) o polipropileno orientado biaxialmente (Perez-Pena y J., 2004) entre otros. La transmisividad de estos materiales se encuentra en un rango de entre 80% y 97%. Además, los test de transmisividad que se han realizado en los trabajos anteriormente citados utilizan diferentes rangos del espectro electromagnético (radiación solar, radiación PAR o rangos espectrales específicos centrados en el rojo y en el verde), e incluso distintas variables radiativas (radiación global, directa y difusa, radiación neta), por lo que la heterogeneidad de estos estudios ocasiona la existencia de resultados dispares. Por ejemplo, con respecto a la radiación difusa, hay estudios que afirman que el material utilizado aumenta la componente difusa de la radiación solar (Pickering et al., 1993; Leadley y Drake, 1993); mientras que otros estudios sostienen que existe atenuación tanto de la radiación directa como difusa (Perez-Pena y J., 2004).

Con respecto a las características geométricas, las cámaras construidas con estos materiales tienen una altura aproximada de 1m y las plantas que encierran de 0.5-0.8m. Por lo tanto, para ángulos cenitales menores a 45° la radiación entra por el techo de la cámara mientras que para ángulos mayores la radiación entra por las paredes laterales, siendo más correcto, para esta última situación, hablar de ángulo de incidencia, siendo el ángulo complementario al ángulo cenital en el caso de una pared vertical. En este sentido, las cámaras esféricas parecen ser las más correctas en términos de transmisividad, ya que el ángulo de incidencia siempre sería normal a la superficie de la cámara. Sin embargo, este tipo de geometría presenta desventajas con respecto a la construcción y al manejo práctico de la cámara.

En definitiva, es evidente la falta de estandarización tanto en los materiales que se utilizan como en el procedimiento que se lleva a cabo para evaluar sus características radiativas y espectrales por lo que es necesario cuantificar la transmisividad de los sistemas de cámaras antes de analizar y comparar datos de flujos gaseosos entre la planta y la atmósfera. Consecuentemente, el cálculo de un coeficiente de atenuación

permitirá el análisis apropiado de estos flujos, de valores de Eficiencia en el Uso de Radiación (*Light Use Efficiency, LUE*) o de curvas de respuesta a luz, entre otros parámetros. Incluso, hay estudios que tratan de modelizar la atenuación de la radiación incidente con respecto a la utilización de los sistemas de cámaras (Kim et al., 2004).

II. EFECTO DE DILUCIÓN

INTRODUCCIÓN

La dilución de las muestras de CO₂ debido a un aumento en la fracción molar de vapor de agua produce un aumento en la fracción molar de aire húmedo, causando una subestimación de la fracción molar de CO₂ referido a aire húmedo (Hubb, 2012). El aire que compone la atmósfera terrestre tiene un contenido de vapor de agua variable, temporal y espacialmente, por lo que debemos prestar especial atención a aquellas variables escalares que describen cantidades de un gas traza contenido en una mezcla de gases entre los que se encuentra el vapor de agua. En este contexto, y refiriéndonos al CO₂, las variables escalares usualmente utilizadas son: concentración, densidad, fracción molar y razón de mezcla. Sin embargo, sólo ésta última es la que se debe utilizar. La razón de mezcla de CO₂ se define como la razón entre la masa de CO₂ y la masa de un conjunto de moléculas denominadas “aire seco” (exclusión del vapor de agua). Por lo tanto, su valor no está influenciado por procesos de conducción de calor, compresión o expansión, evaporación o difusión de vapor de agua (Kowalski y Serrano-Ortiz, 2007).

El uso de cualquiera de las técnicas anteriormente descritas implica, en la mayoría de los casos, la utilización de un analizador de gases en el infrarrojo (IRGA), el cual permite medir y registrar las cantidades (fracción molar, densidad o razón de mezcla) de los gases que nos interesa cuantificar, en nuestro caso CO₂ y vapor de agua simultáneamente. En la actualidad, hay multitud de modelos y marcas de IRGA disponibles en el mercado, sin embargo, no todos incorporan correcciones para todos los errores que se derivan del proceso de medida.

La presencia de vapor de agua es una de las fuentes de error más importantes cuando utilizamos un IRGA. Los procesos que causan este error son, por una parte, la dilución de las muestras de CO₂ (explicado anteriormente) y el fenómeno de sensibilidad cruzada (*cross-sensitivity*) debido a la existencia de las mismas bandas de absorción para el CO₂ y el vapor de agua (Hubb, 2012; Neftel et al., 2010), provocando la sobreestimación en la medida de la cantidad de CO₂.

En este trabajo, se procede a describir, analizar y cuantificar el error de dilución en la utilización de sistemas de cámaras de cierre transitorio (CCT) para la medida de flujos de CO₂ entre una planta y la atmósfera.

BASES FÍSICAS ERROR DE DILUCIÓN Y CORRECCIÓN

Para cualquier mezcla de gases con una temperatura y presión constantes, un aumento en la cantidad de uno de sus componentes resultará en una disminución proporcional en la cantidad del resto de componentes. Esto ocurre porque, tal y como se muestra en la Ley de los Gases Ideales, sólo un determinado número de moléculas puede ocupar un volumen dado.

$$N = \frac{PV}{RT} \tag{5}$$

Si N representa el número total de moléculas en una mezcla de gases con múltiples componentes, entonces N equivale a la suma de las cantidades de cada uno de los componentes (n_i), en moles.

$$N = \sum n_i \quad (6)$$

Si cierta cantidad del gas diluyente (n_d), vapor de agua en nuestro caso, es añadida a la muestra, manteniéndose constante la presión y la temperatura, entonces la suma de n_i debe reducirse en una cantidad equivalente a la que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} N &= \sum n'_i + n_d \\ N - n_d &= \sum n'_i \\ N \left(1 - \frac{n_d}{N}\right) &= \sum n'_i \end{aligned} \quad (7)$$

donde n'_i es la cantidad molar diluida del componente i de la mezcla.

El término entre paréntesis en la ecuación (7) representa la proporción en el número total de moles en la mezcla compuesta por todos los componentes excluyendo el gas disolvente. Sustituyendo N para la ecuación (6):

$$\sum n_i \left(1 - \frac{n_d}{N}\right) = \sum n'_i \quad (8)$$

Esta ecuación tiene solución para el número de moles de todos los componentes si el gas diluyente no está presente. Escribimos la ecuación (8) en términos de fracción molar (X) dividiendo todos los términos por N :

$$\sum X_i = \frac{\sum X'_i}{1 - X_d} \quad (9)$$

Donde la fracción molar del componente i , X_i , es igual a n_i/N . Para un componente específico de la mezcla de gases, la fracción molar del componente i en ausencia del gas diluyente será:

$$X_i = \frac{X'_i}{1 - X_d} \quad (10)$$

La dilución de las muestras de CO₂ no es importante cuando se realizan medidas instantáneas de la fracción molar de CO₂, sin embargo, puede conllevar errores significativos cuando se trata de medidas de flujo de CO₂, en muchos casos utilizadas en la estimación de tasas fotosintéticas de organismos vegetales. Por lo tanto, cuando el objetivo es conocer el contenido de CO₂ de una muestra de aire o gas específica, la corrección del error de dilución no es necesaria. Sin embargo, en situaciones donde se llevan a cabo comparaciones entre fracciones molares de un determinado componente contenido en mezclas de gases sometidas a variaciones, la corrección del efecto de dilución sí es importante (Penning et al. 1984).

En la práctica, lo que frecuentemente interesa conocer es el flujo de CO₂ en ausencia de vapor de agua, o estandarizar medidas de flujo de CO₂ a un mismo contenido de vapor de agua. Sin embargo, el término de corrección es diferente en función del tipo de técnica que se utilice. Las correcciones que se aplican en sistemas abiertos y sistemas cerrados de medida y en la técnica *eddy covariance* pueden encontrarse en Hubb, 2012.

A continuación, se describe el diseño experimental que se ha llevado a cabo para cuantificar el error de dilución cuando utilizamos un sistema de cámara de cierre transitorio para medir flujos de CO₂. Los datos utilizados proceden de campañas de campo realizadas en el “El Llano de los Juanes” (Sierra de Gádor, Almería, España).

MATERIAL Y MÉTODOS

Sitio experimental

El “Llano de los Juanes” es una llanura con una cobertura mayoritariamente de matorral mediterráneo situada a 1600 m de altitud y a 25 km de la costa, localizada dentro de los límites de la Sierra de Gádor (Almería, 36° 55' 41.7''N; 2° 45' 1.7''W).

El clima que presenta es mediterráneo subhúmedo montano con una temperatura media anual de 12 °C y una precipitación media anual de 475 mm distribuida principalmente durante el otoño e invierno, presentando veranos extremadamente secos. Los vientos predominantes provienen del norte-noreste durante el día (45% del viento total durante el día) y del sur durante la noche. La vegetación es diversa y presenta una baja densidad, donde predominan (% de cobertura de suelo) tres especies perennes: *Festuca scariosa* (Lag.) Hackel (18.8%), *Hormathophilla spinosa* (L.) Küpfer (6.8%) y *Genista pumila* (Vierh.) ssp. *pumila* (5.5%). Otras especies presentes son *Thymus serpyllodes*, *Phlomis lychnitis*, *Ramnus murtilifolia* y *Quercus spp.* La roca que subyace el estrato edáfico de la Sierra de Gádor es roca carbonatada, en su mayoría con calizas de coloración oscura. Para obtener información más detallada consultar el trabajo de Serrano-Ortiz *et al.* (2009).

Descripción de la cámara de cierre transitorio

La cámara que se ha diseñado y construido para realizar este estudio es una variación de la cámara descrita por Reicosky y Peters (1977), la cual permite medir simultáneamente los intercambios de CO₂ y vapor de agua a escala de planta. Esta cámara tiene una morfología cúbica y volumen total de 1 m³, siendo de un tamaño suficiente para contener una planta de tipo matorral. La estructura está formada por 12 segmentos de aluminio con 5 láminas de poliéster “*crystal clear*” de 75 µm de grosor

(Llumar®), las cuales constituyen las paredes de la cámara. La parte inferior de la cámara queda fijada al suelo mediante la colocación de collares siendo los flujos provenientes del suelo excluidos mediante la colocación de una lámina de polietileno rodeando el tronco del matorral.

El IRGA (Li-840, Li-cor, Lincoln, NE, EEUU) mide simultáneamente las concentraciones de CO₂ y vapor de agua (referido a aire seco) en el interior de la cámara con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, siendo el flujo volumétrico de entrada de 1 L min⁻¹ de aire. Para garantizar que el aire muestreado sea representativo de todo el aire encerrado en la cámara se han colocado 2 ventiladores de 8.9 cm de diámetro y 12 V, fijados a la estructura de aluminio, cuya función es mezclar y homogenizar el aire del interior de la cámara durante el período de muestreo. El sistema de muestreo funciona gracias a la utilización de una bomba de aire que garantiza la circulación del aire confinado. Mediante este circuito el aire es tomado del interior de la cámara a través de varios tubos flexibles perforados longitudinalmente colocados sobre la planta y distribuidos espacialmente por todo el interior de la cámara.

La temperatura del aire en el interior de la cámara se registra mediante un termistor (PT100) mientras que la temperatura de la planta se mide con un termómetro infrarrojo (IRTS-P, Apogee, UT, EEUU) colocado en la parte central superior de la estructura, justo encima de la planta que se desea monitorizar. Además, se ha medido la radiación PAR (*Photosynthetically Active Radiation*) mediante un sensor PAR (Li-190, Li-Cor, Lincoln, NE, EEUU) acoplado al exterior de la cámara. Todos los datos son registrados en un sistema de adquisición de datos (CR1000, Campbell Scientific, Logan, UT, EEUU), y a partir de éstos se calcula la presión de vapor en saturación (e_s), el déficit de presión de vapor (DPV), las tasas de asimilación neta y transpiración (A_n , T_p), y la eficiencia en el uso del agua (WUE, *Water Use Efficiency*). Todo el sistema se mantiene en funcionamiento mediante 2 baterías de 12 V, una conectada al IRGA y la otra al sistema de adquisición de datos, al sistema de ventilación y a la bomba de vacío.



Figura 2. Cámara de cierre transitorio midiendo intercambios de CO₂ entre una planta de *Festuca scariossa* y la atmósfera en “El Llano de los Juanes”.

Métodos de cálculo

Las tasas de asimilación neta y transpiración han sido calculadas a partir de las pendientes iniciales de las fracciones molares de CO_2 y vapor de agua (*versus* tiempo) generadas por el intercambio gaseoso planta-atmósfera (Fig. 3). Las correcciones de los flujos han sido llevadas a cabo de acuerdo al procedimiento propuesto por (Pérez-Priego et al., 2010). La viabilidad del sistema está demostrada mediante los cambios lineales en las fracciones molares de CO_2 y las mínimas variaciones en el ambiente interior de la cámara.

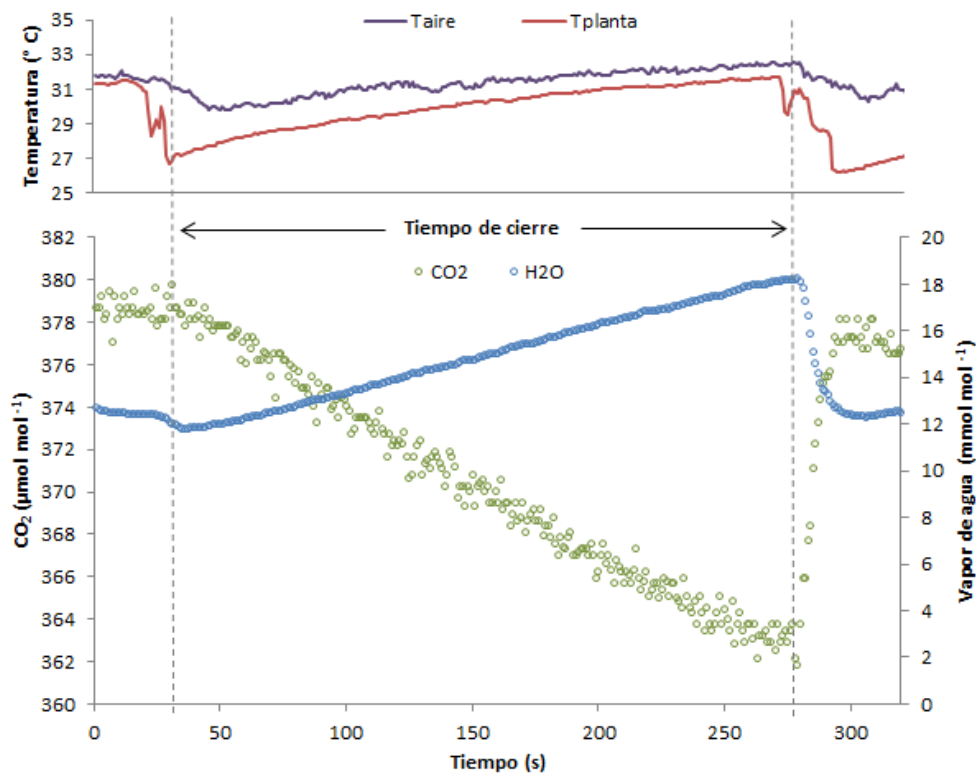


Figura 3. Cambios registrados en la fracción molar de CO_2 (ref. aire seco) y vapor de agua y en las variables ambientales dentro de la cámara (temperatura del aire y de la planta) durante el tiempo de cierre.

RESULTADOS

En este apartado se presentan resultados referentes a la variación de la magnitud del error de dilución en función de diferentes variables (transpiración, déficit de presión de vapor, tiempo) para medidas de flujos de CO_2 , considerando 3 escalas temporales diferentes: medidas instantáneas, medidas de un ciclo diurno, y medidas estacionales.

a) Medidas instantáneas

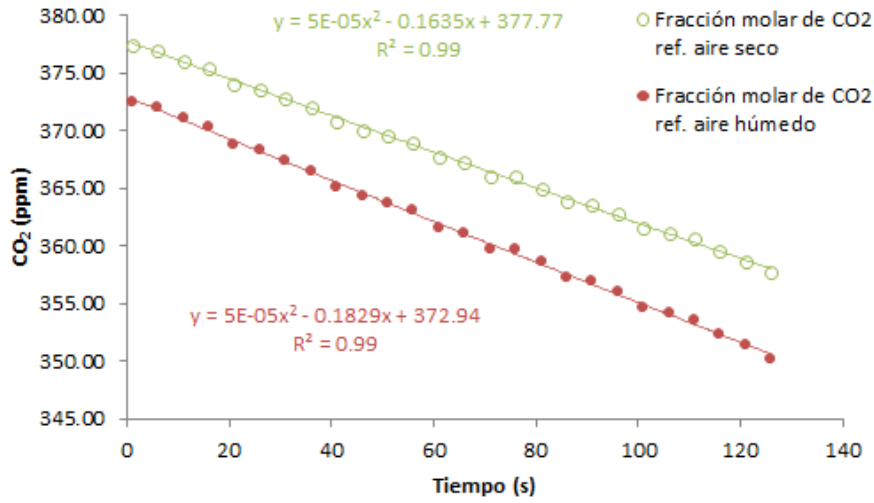


Figura 4. Variación en la fracción molar de CO₂ referido a aire seco y en la fracción molar de CO₂ referido a aire húmedo con respecto al tiempo durante el período de medida utilizando una cámara de cierre transitorio.

Con respecto a las medidas instantáneas de la fracción molar de CO₂ (Fig. 4), el efecto de dilución provoca la subestimación de la cantidad de CO₂ presente en la muestra de aire, siendo el error promedio, durante todo el periodo de medida, del 1.66%. Sin embargo, cuando calculamos la diferencia entre la variación de la fracción molar de CO₂ referido a aire húmedo y a aire seco con respecto al tiempo (segundo término de la ecuación de ambas curvas; Fig.4) es mucho mayor que en el caso anterior. La no corrección del error de dilución provoca una subestimación de este parámetro del 11.87%, por lo que la tasa de asimilación neta ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol aire}^{-1} \text{ s}^{-1}$) es sobreestimada cuando el error de dilución no es corregido.

b) Medidas a escala diaria.

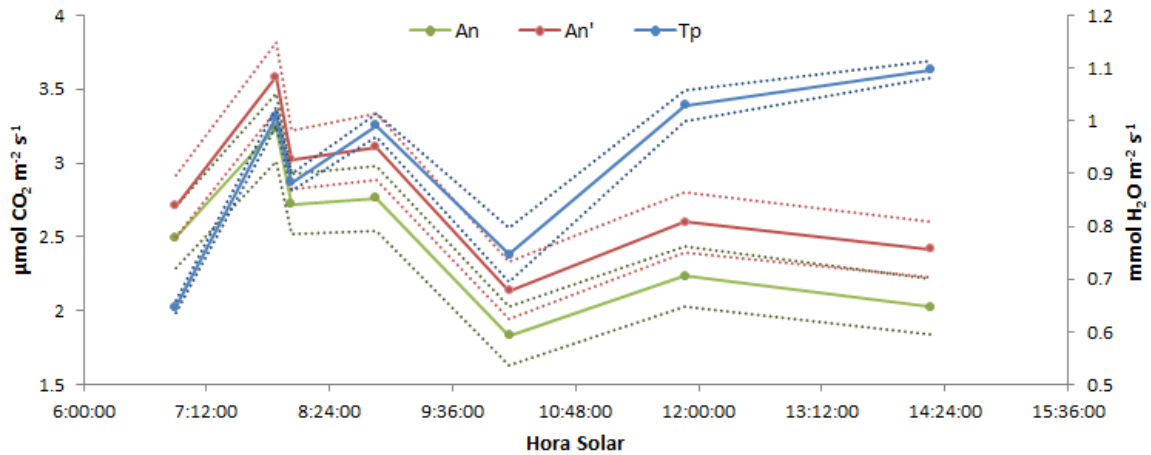


Figura 5. Patrones diarios de los flujos de transpiración (T_p), de los flujos de asimilación neta de CO₂ corregidos por el efecto de dilución (A_n) y sin corregir (A_n') de un individuo de la especie *Genista pumila* medidos en condiciones de cielo despejado durante el 24 de julio de 2012 en “El Llano de los Juanes” (Sierra de Gádor, Almería).

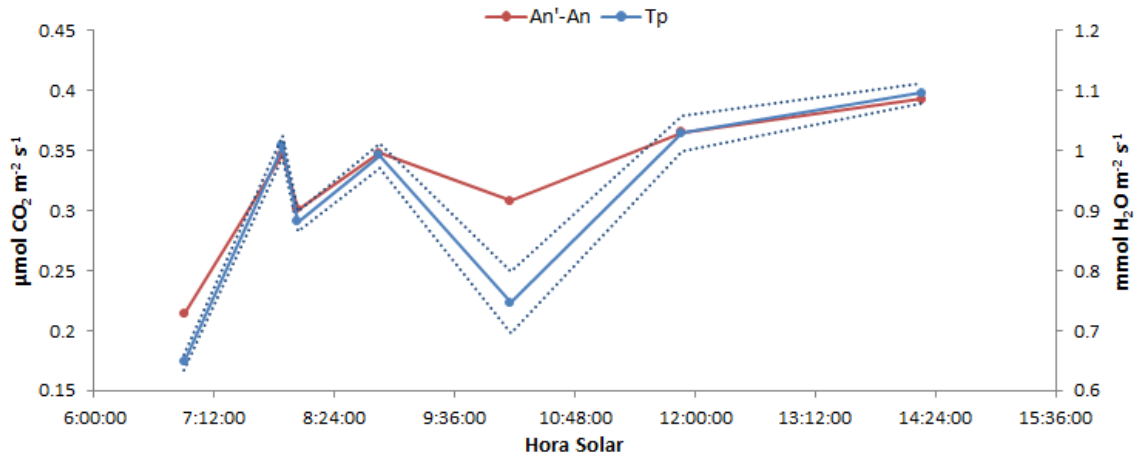


Figura 6. Patrones diarios de los flujos de transpiración (T_p), y de la diferencia entre los flujos de asimilación neta corregidos por el efecto de dilución y sin corregir (rojo) de una planta de *Genista pumila* (Vierh.) ssp. *pumila* medidos en condiciones de cielo despejado durante el 24 de julio de 2012 en “El Llano de los Juanes”.

Hora Solar	ϵ (%)
06:54	8.57
07:52	10.70
08:02	11.06
08:51	12.59
10:09	16.83
11:52	16.37
14:15	19.42

Tabla 7. Error de dilución (ϵ) para cada una de las medidas de flujos de CO_2 de *Genista pumila* medidos en condiciones de cielo despejado durante el 24 de julio de 2012 en “El Llano de los Juanes” (Sierra de Gádor, Almería).

En base a los patrones diarios de asimilación neta corregida y sin corregir (Fig. 3), el error de dilución integrado durante un ciclo de 7 horas se estima de un 13.64%, siendo en todos los casos, la asimilación neta sobreestimada con respecto a la real. Además, en la figura 6 y en la tabla 7, podemos observar que el error aumenta cuando las medidas son realizadas en momentos más próximos al atardecer, que coincide con aquellos momentos en los que la transpiración alcanza valores máximos.

c) Medidas a escala estacional.

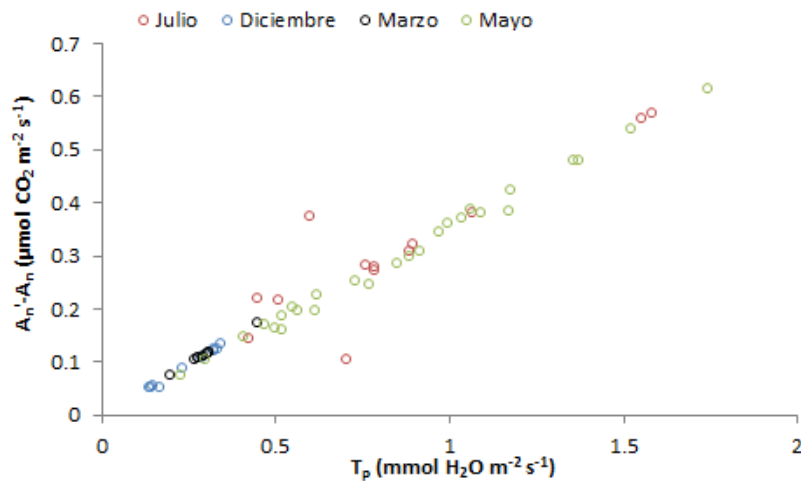


Figura 7. Diferencia entre los valores de asimilación neta corregida por el efecto de dilución (A_n) y sin corregir (A_n') frente a valores de transpiración (T_p) medidos con la cámara de cierre transitorio en “El Llano de los Juanes” durante los días 24 de julio 2012, 4 de diciembre 2012, 14 de marzo 2013 y 22 de mayo de 2013, desde el amanecer hasta el atardecer.

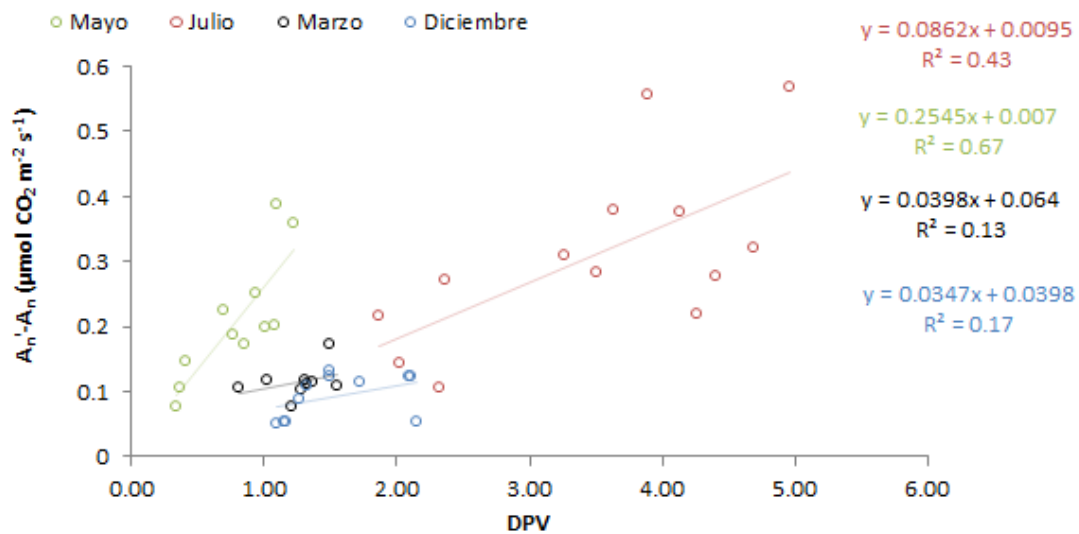


Figura 8. Diferencia entre los valores de asimilación neta corregida por el efecto de dilución (A_n) y sin corregir (A_n') frente a valores de déficit de presión de vapor (DPV) obtenidos mediante el uso de la cámara de cierre transitorio en “El Llano de los Juanes” durante los días 24 de julio 2012, 4 de diciembre 2012, 14 de marzo de 2013 y 22 de mayo de 2013, desde el amanecer hasta el atardecer.

En la figura 7 podemos observar la correlación lineal que existe entre el error causado por el efecto de dilución (diferencia entre flujo de asimilación neta corregido y sin corregir) y la transpiración. Este último proceso consiste en la emisión de moléculas de vapor de agua a través de los estomas de las hojas de las plantas, debido a la diferencia entre la presión parcial de vapor de agua dentro y fuera de la hoja, produciéndose ambos procesos simultáneamente. Los valores máximos de transpiración se presentan durante

los meses de mayo y junio, mientras que en diciembre y marzo alcanzan valores mínimos.

Con respecto a la figura 8, también observamos que existe una relación directamente proporcional entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la diferencia entre flujo de asimilación neta corregido y sin corregir, sin embargo, la correlación no es tan lineal como ocurre con la transpiración. Los valores máximos de DPV se registran en julio, siendo el período más seco, y por tanto el de mayor demanda evaporativa en la atmósfera, por lo que la diferencia entre la presión parcial de vapor de agua dentro y fuera de la hoja será mayor dando lugar a flujos de transpiración más altos y en consecuencia, a un mayor error de dilución. Los meses de mayo, diciembre y marzo presentan valores de DPV mucho menores, por lo que la magnitud del error también disminuye.

DISCUSIÓN

En base a los resultados presentados anteriormente, el error de dilución es mucho menor cuando medimos cantidades de CO₂ puntuales (-1.7 %) en comparación con el error cometido en el cálculo de flujos de asimilación neta (+11.9 %) como en el cálculo del balance diario de carbono (+13.6 %). De manera que, la subestimación de la fracción molar de CO₂ se traduce en la sobrestimación de los flujos de asimilación neta medidos a diferentes escalas temporales.

En general, la magnitud del error de dilución depende del flujo de vapor de agua presente en la mezcla de gases, y por tanto, de la transpiración llevada a cabo por la planta durante el período de medida, por lo que el patrón de transpiración de la especie muestreada es un factor clave en la evaluación de este error a escalas estacionales o anuales ya que no solo depende de las condiciones ambientales sino también de factores biológicos, tales como la conductancia estomática. Si observamos la figura 8 podemos comprobar que para cada período del año (julio, diciembre, marzo y mayo) los valores de la diferencia entre flujos de asimilación corregidos y sin corregir, que dependen de la transpiración, presentan pendientes diferentes. En mayo la pendiente es máxima, mientras que los valores mínimos se registran en diciembre y marzo. Este hecho puede ser debido a la variación de la conductancia estomática a lo largo de las diferentes estaciones del año. Durante el período de crecimiento (mayo), la planta necesita mucho CO₂ para crear biomasa por lo que abre sus estomas dando lugar a flujos de transpiración altos. Sin embargo, durante diciembre y marzo, la vegetación está más inactiva no necesitando tanto CO₂ y por tanto, pudiendo mantener sus estomas relativamente cerrados dando lugar a menores flujos de transpiración.

Por otra parte, es importante destacar el hecho de que en condiciones con un alto contenido de vapor de agua en el aire, la fracción molar tendería a infinito, ya que el vapor de agua desplazaría a la totalidad del aire seco. Sin embargo, esta situación no ocurre normalmente en ambientes naturales.

A pesar de la importancia del efecto de dilución, existe un gran número de estudios en los que no se ha corregido este error (Alterio et al., 2006; Baker et al., 2009; Corelli-Grappadelli, 1993; Dugas et al., 1997; Giuliani et al., 1997; Hymus et al., 2003; Perez-Pena y J., 2004; Wünsche y Palmer, 1997), ya que el modelo de IRGA utilizado no aplica ninguna corrección a los datos registrados ni los autores han corregido el error

una vez obtenidos los datos. En este sentido, es importante tener en cuenta que no todos los modelos de IRGA cometen este error, por lo que antes de interpretar los datos registrados por el instrumento, debemos saber si éstos incluyen la corrección de dilución. Existen modelos de IRGA que sí la realizan como por ejemplo Li-6200, Li-6400XT, Li-7200 o Li-8100. Otros no, como por ejemplo el Li-800, Li-840 o Li-7500, por lo deberíamos realizar la corrección de dilución una vez registrados los datos.

A parte de las correcciones presentadas anteriormente, existen otros métodos para evitar el error de dilución, como por ejemplo, desecar el aire antes de que entre en el IRGA haciéndolo pasar por compuestos como sílica-gel (Poni et al., 1997) o colocando filtros hidrofóbicos (Teitel et al., 2011). Este tipo de métodos previene tanto el efecto de dilución como el de sensibilidad cruzada.

En definitiva, el error de dilución es la consecuencia del uso de una variable incorrecta para medir cantidades o flujos de un gas traza, en este caso CO₂. Como hemos visto, este hecho puede conducirnos a interpretar los datos de una manera errónea y a sobreestimar la capacidad de fijación de C de las plantas.

CONCLUSIONES

I) TEST TRANSMISIVIDAD

1. La evaluación de las características espectrales del material utilizado para la construcción de sistemas cámaras de cierre transitorio es necesaria, ya que la variación de la radiación incidente tras su paso por el material puede alterar la actividad fotosintética de la planta.
2. La estandarización de la evaluación de las características espectrales es crucial para poder comparar resultados debido a la gran diversidad de materiales utilizados y de test realizados.
3. De los dos materiales estudiados en este trabajo, el material *LLumar*® se presenta como el más apropiado para la construcción de sistemas de cámaras, ya que provoca una menor atenuación de la radiación PAR global incidente cuando existe una variación del ángulo cenital. Aunque la atenuación de la radiación PAR global con incidencia normal sea menor en el caso del material *Plexiglas*®, los sistemas de cámaras se utilizan generalmente para realizar medidas de flujos de CO₂ durante todo un ciclo diurno siendo el ángulo de incidencia variable.

II) ERROR DE DILUCIÓN

1. La razón de mezcla es la variable más apropiada para referirnos a cantidades absolutas o flujos de CO₂ porque es una variable que se conserva pese a que existan procesos de transferencia de calor o presencia de vapor de agua. De esta forma, se evita el error de dilución sin necesidad de realizar ninguna corrección.
2. Dado que esta corrección es más importante cuando trabajamos con flujos que con cantidades absolutas de CO₂, la corrección del error de dilución es imprescindible en aquellos estudios donde el objetivo principal es la cuantificación balance de carbono de un determinado ecosistema, ya que está basada en los flujos existentes entre el suelo y la atmósfera, y la vegetación y la atmósfera y no en medidas absolutas de concentración de CO₂.
3. Todas las técnicas utilizadas para la medida o estimación de los flujos de CO₂ deben tener en cuenta este error, especialmente aquellas que trabajan con volúmenes cerrados, tales como las cámaras de cierre transitorio.
4. La magnitud del error de dilución varía en función de las condiciones ambientales y también en función de variables biológicas tales como la conductancia estomática.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado ha sido realizado gracias a la ayuda y apoyo de varias personas. En primer lugar, quiero agradecer a mi tutora, Penélope Serrano Ortiz su infinita disponibilidad para ayudarme siempre que lo he necesitado, gracias por tus buenos consejos y por estar siempre dispuesta a echarme una mano. Gracias a Andy, por guiarme y por tus buenas y oportunas explicaciones. También quiero darte las gracias, Enrique, por contestar todas mis dudas, y por hacer que la realización de este trabajo haya ido acompañada de muchas risas y compañerismo. Óscar, este trabajo existe gracias a Casimira, tu gran creación dentro de este grupo, así que parte del mérito también es tuyo. María, muchas gracias por estar siempre ahí y también al resto de mis compañeros de despacho. Gracias a toda la gente con la que he trabajado y disfrutado en las campañas de campo: Arnaud, Agustí, Paco, Cecilio, Paula, Thomas...

Por último, gracias a mis padres y hermanos por darme siempre apoyo y ánimos para seguir adelante.

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto internacional GHG- Europe (Call FP7-ENV-2009-1.1.3.1; Project Code 244122), el proyecto nacional CARBORAD (CGL2011-27493) y el proyecto regional CARBOLIVAR (RNM-7186).

REFERENCIAS

- Alterio, G., Giorio, P. and Sorrentino, G., 2006. Open-system chamber for measurements of gas exchanges at plant level. *Environmental Science and Technology*, 40(6): 1950-1955.
- Baker, J.T. et al., 2009. Canopy gas exchange measurements of cotton in an open system. *Agronomy Journal*, 101(1): 52-59.
- Boucot, A.J. and Gray, J., 2001. A critique of phanerozoic climatic models involving changes in the CO₂ content of the atmosphere. *Earth-Science Reviews*, 56(1-4): 1-159.
- Breuninger, C., Oswald, R., Kesselmeier, J. and Meixner, F.X., 2012. The dynamic chamber method: Trace gas exchange fluxes (NO, NO₂, O₃) between plants and the atmosphere in the laboratory and in the field. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(5): 955-989.
- Corelli-Grappadelli, L.a.M., E., 1993. A whole-tree system for gas-exchange studies. *HortScience*, 28(1): 41-45.
- Chojnicki, B.H. et al., 2010. Measurements of carbon dioxide fluxes by chamber method at the Rzecin wetland ecosystem, Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(2): 283-291.
- Davidson, E.A., Belk, E. and Boone, R.D., 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 4(2): 217-227.
- Dugas, W.A., Reicosky, D.C. and Kiniry, J.R., 1997. Chamber and micrometeorological measurements of CO₂ and H₂O fluxes for three C₄ grasses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 83(1-2): 113-133.
- Friend, A.D. et al., 2007. FLUXNET and modelling the global carbon cycle. *Global Change Biology*, 13(3): 610-633.
- Giuliani, R., Nerozzi, F., Magnanini, E. and Corelli-Grappadelli, L., 1997. Influence of environmental and plant factors on canopy photosynthesis and transpiration of apple trees. *Tree Physiology*, 17(10): 637-645.
- Graf, A. et al., 2013. Validation of a minimum microclimate disturbance chamber for net ecosystem flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 174-175: 1-14.
- Granier, A. et al., 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(1-2): 123-145.
- Hubb, J., 2012. The importance of water vapour measurements and corrections. Application note n. 129, Li-COR Biosciences.

- Hutchinson, G.L. and Livingston, G.P., 2002. Soil–Atmosphere Gas Exchange. *Methods of Soil Analysis*, pp. 1159-1182.
- Hymus, G.J. et al., 2003. Effects of elevated atmospheric CO₂ on net ecosystem CO₂ exchange of a scrub–oak ecosystem. *Global Change Biology*, 9(12): 1802-1812.
- Janssens, I.A. et al., 2003. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science*, 300(5625): 1538-1542.
- Kabwe, L.K., Hendry, M.J., Wilson, G.W. and Lawrence, J.R., 2002. Quantifying CO₂ fluxes from soil surfaces to the atmosphere. *Journal of Hydrology*, 260(1-4): 1-14.
- Kasten, F., 1965. A new table and approximation formula for the relative optical air mass. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B*, 14(2): 206-223.
- Keeling, C.D., 1960. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, XII(2).
- Kim, S.H., Reddy, V.R., Baker, J.T., Gitz, D.C. and Timlin, D.J., 2004. Quantification of photosynthetically active radiation inside sunlit growth chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126(1-2): 117-127.
- Kowalski, A. and Serrano-Ortiz, P., 2007. On the relationship between the eddy covariance, the turbulent flux, and surface exchange for a trace gas such as CO₂. *Boundary-Layer Meteorology*, 124(2): 129-141.
- Kowalski, A.S. et al., 2008. Can flux tower research neglect geochemical CO₂ exchange? *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(6-7): 1045-1054.
- Krinner, G. et al., 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1): 1-33.
- Langensiepen, M., Kupisch, M., van Wijk, M.T. and Ewert, F., 2012. Analyzing transient closed chamber effects on canopy gas exchange for optimizing flux calculation timing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164: 61-70.
- Lasslop, G. et al., 2010. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 16(1): 187-208.
- Leadley, P.W. and Drake, B.G., 1993. Open top chambers for exposing plant canopies to elevated CO₂ concentration and for measuring net gas exchange. *Vegetatio*, 104-105(1): 3-15.
- Linderson, M.L. et al., 2012. Up-scaling of water use efficiency from leaf to canopy as based on leaf gas exchange relationships and the modeled in-canopy light distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152(0): 201-211.

- Mahadevan, P. et al., 2008. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO₂ exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM). *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2).
- Mercado, L.M. et al., 2009. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature*, 458(7241): 1014-1017.
- Molina-Vázquez, F., 2007. Ficha Informativa Ramsar.
- Monteith, J. L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747–766.
- Moriana, A., Villalobos, F.J. and Fereres, E., 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive (*Olea europaea* L.) leaves to water deficits. *Plant, Cell & Environment*, 25(3): 395-405.
- Neftel, A. et al., 2010. N₂O exchange over managed grassland: Application of a quantum cascade laser spectrometer for micrometeorological flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(6): 775-785.
- Nie, D., He, H., Mo, G., Kirkham, M.B. and Kanemasu, E.T., 1992. Canopy photosynthesis and evapotranspiration of rangeland plants under doubled carbon dioxide in closed-top chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 61(3–4): 205-217.
- Niu, S. et al., 2011. Water-use efficiency in response to climate change: from leaf to ecosystem in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 17(2): 1073-1082.
- Penning de Vries, F. W. T., et al. 1984. An error in measuring respiration and photosynthesis due to transpiration. *Photosynthetica* 18:146-149.
- Perez-Pena, J. and J., T., 2004. A portable whole canopy gas exchange system for several mature field-grown grapevines. *Vitis*, 43(1): 7-14.
- Pérez-Priego, O., Serrano-Ortiz, P., Sánchez-Cañete, E.P., Domingo, F. and Kowalski, A.S., 2013. Isolating the effect of subterranean ventilation on CO₂ emissions from drylands to the atmosphere. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180: 194-202.
- Pérez-Priego, O., Testi, L., Orgaz, F. and Villalobos, F.J., 2010. A large closed canopy chamber for measuring CO₂ and water vapour exchange of whole trees. *Environmental and Experimental Botany*, 68(2): 131-138.
- Pickering, N.B., Jones, J.W. and Boote, K.J., 1993. Evaluation of the portable chamber technique for measuring canopy gas exchange by crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 63(3-4): 239-254
- Poni, S., Magnanini, E. and Rebucci, B., 1997. An automated chamber system for measurements of whole-vine gas exchange. *HortScience*, 32(1): 64-67.

- Rayment, M.B. and Jarvis, P.G., 1997. An improved open chamber system for measuring soil CO₂ effluxes in the field. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 102(D24): 28779-28784.
- Reichstein, M. et al., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11(9): 1424-1439.
- Reicosky, D.C., Peter, D.B., 1977. A portable chamber for rapid evapotranspiration measurements on field plots. *Agronomy Journal* 69: 729–732.
- Running, S.W. et al., 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, 54(6): 547-560.
- Sánchez-Cañete, E.P., Serrano-Ortiz, P., Domingo, F. and Kowalski, A.S., 2013. Cave ventilation is influenced by variations in the CO₂-dependent virtual temperature. *International Journal of Speleology*, 42(1): 1-8.
- Sanchez-Cañete, E.P., Serrano-Ortiz, P., Kowalski, A.S., Oyonarte, C. and Domingo, F., 2011. Subterranean CO₂ ventilation and its role in the net ecosystem carbon balance of a karstic shrubland. *Geophysical Research Letters*, 38(9).
- Schimel, D.S. et al., 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414(6860): 169-172.
- Sellers, P.J., 1987. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sensing of Environment*, 21(2): 143-183.
- Serrano-Ortiz, P. et al., 2010. Hidden, abiotic CO₂ flows and gaseous reservoirs in the terrestrial carbon cycle: Review and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3): 321-329.
- Sitch, S. et al., 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9(2): 161-185.
- Spencer, J., 1971. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5): 172.
- Steduto, P., Çetinkökü, Ö., Albrizio, R. and Kanber, R., 2002. Automated closed-system canopy-chamber for continuous field-crop monitoring of CO₂ and H₂O fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111(3): 171-186.
- Subke, J.A., Inglima, I. and Cotrufo, M.F., 2006. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: A metaanalytical review. *Global Change Biology*, 12(6): 921-943.

- Teitel, M., Atias, M., Schwartz, A. and Cohen, S., 2011. Use of a greenhouse as an open chamber for canopy gas exchange measurements: Methodology and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(10): 1346-1355.
- Wofsy, S.C. et al., 1993. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 260(5112): 1314-1317.
- Woodward, F.I. and Lomas, M.R., 2004. Vegetation dynamics – simulating responses to climatic change. *Biological Reviews*, 79(03): 643-670.
- Woodward, F.I., Smith, T.M. and Emanuel, W.R., 1995. A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(4): 471-490.
- Wünsche, J.N. and Palmer, J.W., 1997. Portable through-flow cuvette system for measuring whole-canopy gas exchange of apple trees in the field. *HortScience*, 32(4): 653-658.