

Evaluación de la Transmisividad y el Efecto de Dilución en Sistemas de Cámaras de Medida de Intercambios de CO₂ en Plantas

Ana López Ballesteros

*Dpto. Desertificación y Geoecología, Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA-CSIC),
04120 Almería, España*

*Grupo de Física de la Atmósfera, Centro Andaluz de Medio Ambiente (CEAMA) 18006 Granada,
España*

Resumen. En la actualidad existen diversas técnicas para cuantificar el intercambio de CO₂ entre un ecosistema y la atmósfera en función de la escala espacial y de los procesos que se consideren. Los sistemas de cámaras constituyen una técnica reciente y novedosa que permite medir flujos de CO₂ entre una planta y la atmósfera, presentando claras ventajas frente a otras técnicas usualmente empleadas para medir el intercambio gaseoso entre la vegetación y la atmósfera. No obstante, determinados aspectos de estos sistemas pueden generar artefactos en la medida, siendo necesario estudiarlos en detalle. En este trabajo se evalúa, por una parte, la variación de la radiación tras su paso por dos materiales ampliamente utilizados en la construcción de sistemas de cámaras, y por otra parte, el efecto de dilución causado por la existencia de flujos de vapor de agua que puede provocar un error en la medida de CO₂, siempre que no se utilice la variable adecuada para referirnos a la cantidad de CO₂ presente en una muestra de aire.

Palabras clave: Técnicas medida intercambios de CO₂, sistemas de cámaras de cierre transitorio, transmisividad, radiación fotosintéticamente activa, vapor de agua, efecto de dilución.

INTRODUCCIÓN

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), ha producido perturbaciones climáticas (Molina, 2007; Keeling, 1960). Sin embargo, 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.

En la actualidad, 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. En segundo lugar, la respiración del suelo (flujos de CO₂ emitidos del suelo a la atmósfera) puede ser medida mediante dos tipos de técnicas: 1) medidas continuas de la fracción molar de CO₂ a diferentes profundidades en un perfil de suelo (Sanchez-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) y 2) medidas puntuales mediante el uso de cámaras de respiración de suelo. En tercer lugar, el intercambio de CO₂ 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. En cuarto lugar, la estimación del BCNE a escala regional, continental o global sólo es posible mediante la modelización de los flujos de CO₂ 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. En quinto lugar, la asimilación y emisión de CO₂ (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 CO₂ y vapor de agua en un volumen determinado donde se encuentra la planta, mediante el uso de un IRGA.

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.

I. TEST DE TRANSMISIVIDAD

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 *Llumar*® (Crystal Clear, Dupont Teijin Films, Hopewell, EEUU) y *Plexiglas*® (Clear 0A000 GT, Evonik Industries, Darmstadt, Alemania). Las características generales de *Llumar*® son: grosor de 75 µm, peso de 0.010 g cm⁻², permeabilidad baja para CO₂ y vapor de agua, adsorción baja para el vapor de agua, un 90% de transmisividad en el rango espectral PAR.

Las características generales de *Plexiglas*® son: grosor de 3 mm, peso de 2.868 g cm⁻², permeabilidad nula para CO₂ y vapor de agua, 92% de transmisividad para la radiación solar y absorbe la mayoría de la radiación ultravioleta, alta resistencia a impactos y roturas, y también se conserva en condiciones de intemperie presentando una baja tasa de degradación.

Material y Métodos

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).

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. Posteriormente, se cubrió un sensor con el material a evaluar y el otro se dejó descubierto, realizándose varios tipos de medidas con radiación PAR global y radiación PAR difusa (ver Fig. 1).

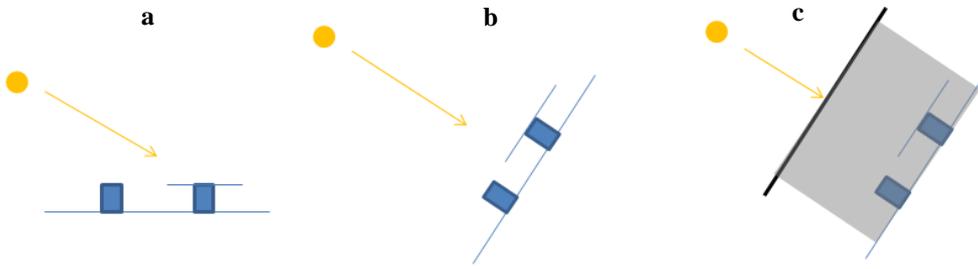


FIGURA 1. Esquema del diseño experimental llevado a cabo. **a)** Medidas de irradiación PAR global para diferentes ángulos cenitales. **b)** Medidas de irradiación PAR global normal a la superficie en diferentes momentos del día. **c)** Medida de irradiación PAR difusa para diferentes momentos del día.

Resultados

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 descubierta, expresada en términos de porcentaje (r_f).

TABLA 1. Valores de la razón entre la irradiación PAR medida con el sensor cubierto con el material *Llumar*® y aquella medida con el sensor descubierta para diferentes valores de masa óptica relativa (m_a) en condiciones de ángulo cenital variable ($r_{f, \theta}$), de ángulo cenital equivalente a cero ($r_{f, p}$) y para condiciones de radiación difusa ($r_{f, dif}$).

Hora solar	Ángulo cenital	m_a	$r_{f, \theta}$ (%)	$r_{f, p}$ (%)	$r_{f, dif}$ (%)
12:15	13.8	1.04	91.321 ± 0.004	91.729 ± 0.005	105.12 ± 0.09
14:18	30.3	1.16	91.265 ± 0.004	91.998 ± 0.012	104.58 ± 0.08
15:38	45.5	1.43	90.315 ± 0.006	92.170 ± 0.004	102.52 ± 0.04
16:52	60	2.01	88.658 ± 0.014	92.429 ± 0.007	102.19 ± 0.06
18:09	75	3.83	80.632 ± 0.019	93.070 ± 0.012	117.43 ± 0.19

TABLA 2. Valores de la razón entre la irradiancia PAR medida con el sensor cubierto con el material *Plexiglas*® y aquella medida con el sensor descubierto para diferentes valores de masa óptica relativa (m_a) en condiciones de ángulo cenital variable ($r_{f, \theta}$), de ángulo cenital equivalente a cero ($r_{f, p}$) y para condiciones de radiación difusa ($r_{f, dif}$).

Hora solar	Ángulo cenital	m_a	$r_{f, \theta}$ (%)	$r_{f, p}$ (%)	$r_{f, dif}$ (%)
12:15	13.8	1.04	92.709 ± 0.004	95.035 ± 0.004	93.43 ± 0.14
14:18	30.3	1.16	90.010 ± 0.006	95.078 ± 0.008	94.37 ± 0.14
15:38	45.5	1.43	87.324 ± 0.003	94.662 ± 0.018	104.07 ± 0.09
16:52	60	2.01	81.840 ± 0.010	95.511 ± 0.004	101.60 ± 0.12
18:09	75	3.83	69.878 ± 0.014	96.533 ± 0.009	97.24 ± 0.25

Conclusiones

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. EFECTO DE DILUCIÓN

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, variable escalar más apropiada es la razón de mezcla de CO₂, que 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).

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.

Material y Métodos

Las medidas han sido realizadas en 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, $36^{\circ} 55' 41.7''\text{N}$; $2^{\circ} 45' 1.7''\text{W}$). 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 CO_2 y vapor de agua a escala de planta. Esta cámara tiene una morfología cúbica y volumen total de 1 m^3 . La estructura está formada por 12 segmentos de aluminio con 5 láminas de poliéster “*crystal clear*” de $75 \mu\text{m}$ de grosor (Llumar®). La instrumentación que compone la cámara de cierre transitorio consta de: analizador de gases en el infrarrojo, IRGA (Li-840, Li-cor, Lincoln, NE, EEUU), 2 ventiladores de 8.9 cm de diámetro y 12 V, termistor (PT100), termómetro infrarrojo (IRTS-P, Apogee, UT, EEUU), sistema de adquisición de datos (CR1000, Campbell Scientific, Logan, UT, EEUU) y sensor PAR (Li-190, Li-Cor, Lincoln, NE, EEUU).

Resultados

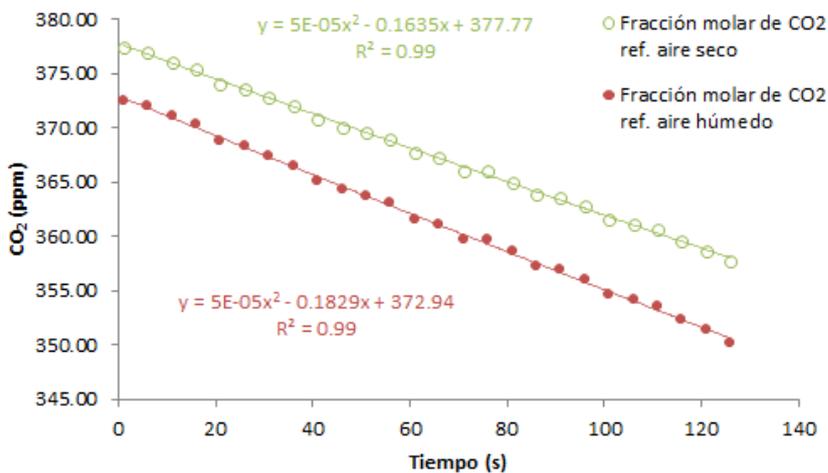


FIGURA 2. Variación en la fracción molar de CO_2 referido a aire seco y en la fracción molar de CO_2 referido a aire húmedo con respecto al tiempo durante el período de medida utilizando una cámara de cierre transitorio.

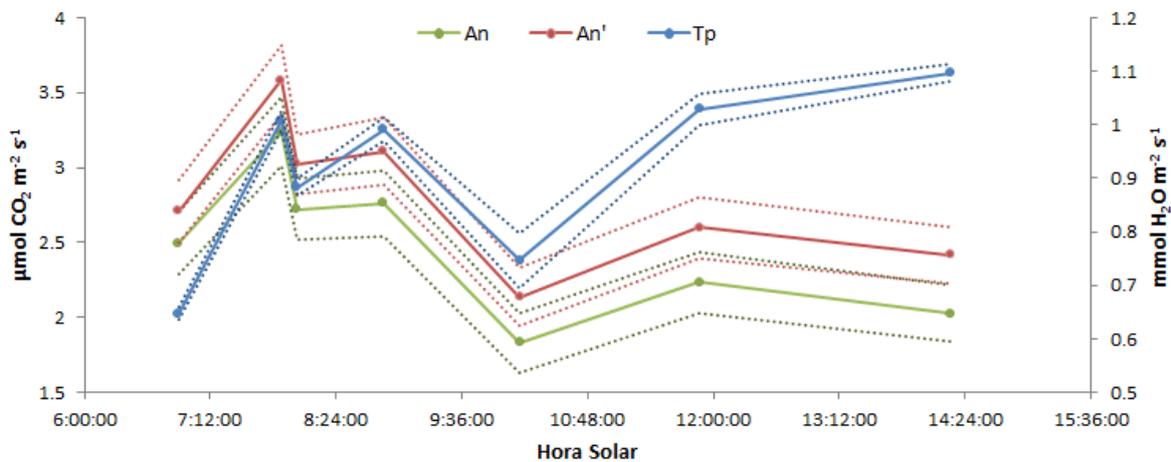


FIGURA 3. Patrones diarios de los flujos de transpiración (T_p), de los flujos de asimilación neta de CO_2 corregidos por el efecto de dilución (A_n) y sin corregir (A_n') de un individuo de la especie *Genista pumila* medidos en condiciones de cielo despejado durante el 24 de julio de 2012 en “El Llano de los Juanes” (Sierra de Gádor, Almería).

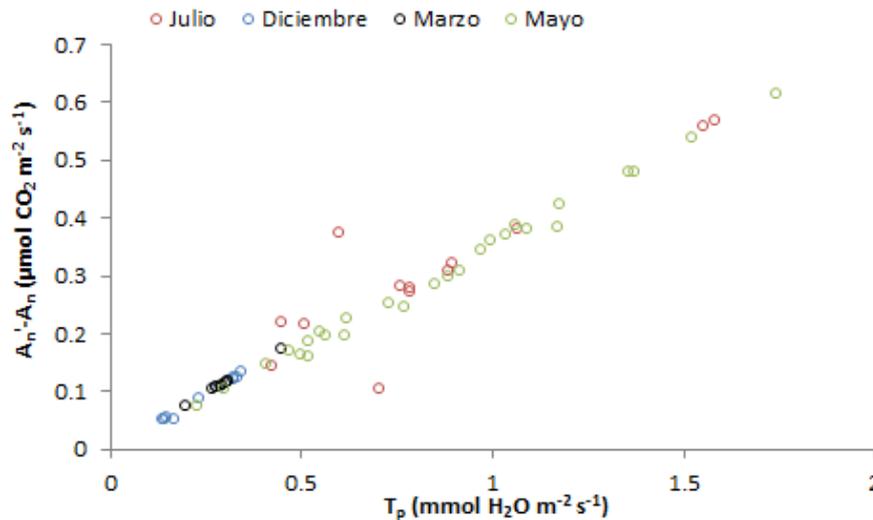


FIGURA 4. Diferencia entre los valores de asimilación neta corregida por el efecto de dilución (A_n') y sin corregir (A_n) frente a valores de transpiración (T_p) medidos con la cámara de cierre transitorio en “El Llano de los Juanes” durante los días 24 de julio 2012, 4 de diciembre 2012, 14 de marzo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

En base a los resultados presentados anteriormente, el error de dilución es mucho menor cuando medimos cantidades de CO_2 puntuales (-1.7 %) (Fig. 2) en comparación con el error cometido en el cálculo de flujos de asimilación neta (+11.9 %) (Fig. 2) como en el cálculo del balance diario de carbono (+13.6 %) (Fig. 3). De manera que, la subestimación de la fracción molar de CO_2 se traduce en la sobrestimación de los flujos de asimilación neta medidos a diferentes escalas temporales.

Conclusiones

1. La razón de mezcla es la variable más apropiada para referirnos a cantidades absolutas o flujos de CO_2 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 CO_2 , 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 CO_2 .
3. Todas las técnicas utilizadas para la medida o estimación de los flujos de CO_2 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

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

- 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.
- Friend, A.D. et al., 2007. FLUXNET and modelling the global carbon cycle. *Global Change Biology*, 13(3): 610-633.
- 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.
- Hubb, J., 2012. The importance of water vapour measurements and corrections. Application note n. 129, Li-COR Biosciences.
- 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.
- Keeling, C.D., 1960. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, XII(2).
- 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.
- 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.
- Molina-Vázquez, F., 2007. Ficha Informativa Ramsar.
- 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.
- 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.
- 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.
- Reicosky, D.C., Peter, D.B., 1977. A portable chamber for rapid evapotranspiration measurements on field plots. *Agronomy Journal* 69: 729-732.
- 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.
- Schimel, D.S. et al., 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414(6860): 169-172.
- 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.
- 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.