

TESIS DE MÁSTER:
ANÁLISIS DEL BALANCE INTERANUAL DE CARBONO
EN UN ECOSISTEMA SEMIÁRIDO DE MATORRAL
MEDITERRÁNEO SOBRE UN SUELO CARBONATADO



Máster en Geofísica y Meteorología

Tesis de Máster dirigida por: Andrew S. Kowalski

Realizada por: Penélope Serrano Ortiz

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
1. INTRODUCCIÓN	4
2. DESCRIPCIÓN DEL ECOSISTEMA Y METODOLOGÍA	7
2.1 DESCRIPCIÓN DEL ECOSISTEMA.....	7
2.2 VARIABLES MEDIDAS E INSTRUMENTACIÓN	8
2.3 ANÁLISIS REALIZADOS	10
a) <i>Control de calidad y procesado de los flujos medidos</i>	10
b) <i>Cobertura de datos y técnicas empleadas para el relleno de huecos en la variable F_c</i>	11
3. RESULTADOS.....	16
3.1 CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....	16
3.2 INTERCAMBIOS DE CARBONO.....	17
a) <i>Comportamiento de los intercambios de carbono</i>	17
b) <i>Balance interanual de carbono</i>	21
4. DISCUSIÓN.....	24
5. CONCLUSIONES	29
6. BIBLIOGRAFÍA.....	30

RESUMEN

Este estudio es una primera aproximación de la estimación del balance interanual (2004-2007) de carbono de un ecosistema sobre suelo carbonatado localizado en la Sierra de Gádor (Almería), donde los procesos biológicos interactúan con los procesos geoquímicos afectando al ciclo del carbono. La cuantificación del balance anual de carbono en un ecosistema (NEE) mediante la aplicación de la técnica *eddy covariance* necesita medidas continuadas del flujo de CO₂ (F_c). Esta condición no se cumple a la hora de aplicar la técnica sobre un ecosistema real ya que surgen problemas de alimentación, rotura de instrumentos, calidad del dato o condiciones meteorológicas adversas, que impiden tener valores de F_c cada media hora durante todo un año sin que se interrumpan las medidas. Esta realidad, hace necesario el uso de metodología eficaz y robusta para el relleno de esos momentos de ausencia de F_c . Dado que el relleno de huecos constituye el principal mecanismo causante de errores en el balance anual de carbono (Dragoni et al. 2007), para la estimación del balance de carbono se han usado dos técnicas: redes neuronales y distribución marginal.

Así, tras casi cuatro años de medidas continuas con un sistema *eddy covariance*, podemos concluir que el ecosistema de matorral sobre suelo carbonatado localizado en la Sierra de Gádor (Almería) presenta un balance anual de carbono que oscila entre -63 (sumidero) y los 29 (fuente) g C m⁻² siendo el promedio anual de -2 ± 23 g C m⁻² año⁻¹ (sumidero neutro de carbono). Otro análisis realizado fue la descomposición de los intercambios de CO₂ en flujos de procedencia geoquímica o biológica para determinar la contribución de ambos procesos en estos intercambios así como las variables de las que depende. En este sentido, se observó que durante los periodos en los que el intercambio de carbono está dominado por los procesos de fotosíntesis y respiración, la variabilidad interanual del flujo medido era consecuencia del índice de área foliar fundamentalmente y del flujo de fotones y la temperatura. Así mismo, durante los periodos en los que el intercambio de carbono está dominado por los procesos geoquímicos (fenómenos de ventilación y precipitación de carbonatos) el flujo de CO₂ medido está relacionado con la evapotranspiración. Como resultado preliminar podemos decir que la contribución de los procesos geoquímicos sobre el balance anual de carbono varía de un 19% en 2004 a un 45% en 2007. Finalmente, es importante destacar que dada la complejidad de los procesos que intervienen en los intercambios de

CO₂ sobre ecosistemas de suelo carbonatado, es necesario futuras investigaciones encaminadas a una mejor división y una caracterización de estos procesos.

1. INTRODUCCIÓN

El interés por la caracterización del ciclo global del carbono surge como consecuencia del descubrimiento de un aumento en la concentración del CO₂ atmosférico (Keeling 1960). Este aumento conlleva un calentamiento global terrestre asociado al consiguiente aumento del efecto invernadero. Ante esta problemática, surge el protocolo de Kyoto como herramienta para favorecer la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. En él se plantea la necesidad de cuantificar las posibles fuentes y sumideros de dicho gas para gestionar las emisiones y promover la conservación de los principales sumideros de CO₂.

Estudios recientes (Tans et al. 1990) han mostrado que menos de la mitad de la cantidad de CO₂ que se emite como resultado de la quema de combustibles fósiles se acumula en la atmósfera. El resto debe acumularse en los océanos y los ecosistemas terrestres. En este sentido, los estudios isotópicos sugieren que los océanos no son responsables de toda esta asimilación, por lo que debe existir un sumidero desconocido de CO₂ en el ecosistema terrestre responsable de que la tasa de incremento de CO₂ en la atmósfera no sea tan elevada como era de esperar dado el reciente incremento de la actividad industrial y los cambios de uso de suelo (Houghton 2002). El conocimiento del mecanismo responsable de tal absorción es fundamental para procurar su continuidad, así como para tenerlo en cuenta a la hora de establecer soluciones al incremento del CO₂.

El estudio del intercambio de CO₂ en distintos ecosistemas y la caracterización de los procesos que intervienen en dicho intercambio, son la clave para comprender el ciclo global del carbono y para evaluar el impacto que las actividades humanas generan sobre los ecosistemas naturales. La técnica micrometeorológica *eddy covariance* (EC) es la empleada por la red internacional FLUXNET. A esta red están adheridos numerosos investigadores de todo el mundo que trabajan en el análisis de los flujos de CO₂ (Baldochi et al. 2001), vapor de agua y calor sensible en distintos ecosistemas. También se llevan a cabo otros estudios colaterales como por ejemplo medidas del intercambio de gases a nivel de la hoja de la planta, caracterizaciones de suelos, variaciones anuales en el índice de área foliar, etc., que complementan y ayudan a entender el funcionamiento de los ecosistemas. En definitiva, lo que pretende esta red

internacional es conocer un poco más a fondo los distintos ecosistemas de todo el mundo en lo que se refiere a los intercambios de gases con la atmósfera y su papel en el ciclo global del carbono. Esta red internacional está compuesta a su vez de distintas redes a nivel continental como es el caso de Asiaflux, Ameriflux o Carboeurope. Gracias a estas redes micrometeorológicas la gran mayoría de los bosques y tierras agrícolas están bien caracterizadas en cuanto a su comportamiento como fuente o sumidero de CO₂ (Valentini et al. 2000; Janssens et al. 2003; Bon-Lamberty et al. 2007; Magnani et al. 2007; Luyssaert et al. 2008).

En este tipo de investigaciones, el flujo terrestre de CO₂ es interpretado y modelizado desde un punto de vista biológico (Houghton 2002; Baldocchi 2003) salvo algunas excepciones (Emmerich 2003; Mielnick et al. 2005). El intercambio neto de CO₂ entre el ecosistema y la atmósfera (NEE) depende de la actividad fotosintética que fija el CO₂ atmosférico y de la respiración que libera CO₂ a la atmósfera. Además de los procesos biológicos, los procesos geoquímicos, asociados a ecosistemas de origen carbonatado, contribuyen a los intercambios de carbono con la atmósfera. Las rocas carbonatadas, como la caliza o la dolomía, junto con el CO₂ procedente de la respiración biológica participan en reacciones químicas que tienen lugar en la fase acuosa del suelo (Emmerich 2003) y puede dar lugar a procesos de disolución o precipitación de carbonatos actuando dichos procesos como sumidero o fuente de CO₂ respectivamente. En este sentido, una reciente publicación (Kowalski et al. 2008) demuestra que los procesos de disolución de carbonatos (procesos geoquímicos) pueden llegar a dominar los intercambios de CO₂ entre el ecosistema y la atmósfera durante épocas de sequía. La importancia de caracterizar estos procesos radica en el hecho de que los suelos carbonatados ocupan un 12-17% del total de la superficie terrestre libre de agua (Ford y Williams 1989).

Así mismo, los ecosistemas áridos y semiáridos se extienden por todos los continentes y comprenden aproximadamente la tercera parte de la superficie terrestre continental (Schlesinger et al. 1990; Okin 2001). Las tierras semiáridas son los ecosistemas predominantes en los climas Mediterráneos y se caracterizan por estar compuestas de parches de vegetación y suelo desnudo (Domingo et al. 1999). Estos ecosistemas son muy sensibles a todo tipo de perturbaciones como incendios, sequías o cambios de uso de suelo (Smith et al. 2000; Asner et al. 2003). A pesar de su vulnerabilidad, se ha

prestado poca atención al estudio de su comportamiento, incluyendo el relativo a los procesos de intercambio de CO₂ y vapor de agua con la atmósfera.

En este trabajo se presenta el balance interanual de carbono de un ecosistema de matorral mediterráneo sobre suelo carbonatado. En este ecosistema no sólo los procesos biológicos (fotosíntesis y respiración) son responsables de este intercambio de CO₂ sino que también intervienen los procesos geoquímicos. Para este estudio se presentan casi cuatro años de medidas continuas de flujo de CO₂ con la técnica *eddy covariance* (años 2004 a 2007). En los momentos de ausencia de medidas de flujo se han usado dos técnicas distintas para el relleno de estos huecos y poder así realizar la integración interanual. Así mismo, se ha realizado un estudio de la importancia de la precipitación en el funcionamiento del ecosistema y su contribución en los procesos geoquímicos. Finalmente, se analizó la dependencia de estos intercambios de CO₂ con otras variables meteorológicas durante periodos en los que estos intercambios estaban dominados por procesos biológicos o geoquímicos.

2. DESCRIPCIÓN DEL ECOSISTEMA Y METODOLOGÍA

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ECOSISTEMA

El área de estudio, Llano de los Juanes, es una meseta cubierta de matorral de alta montaña localizada a 1600 metros de altitud sobre el nivel del mar. El ecosistema bajo estudio se enmarca en la Sierra de Gádor (36°55'41.7''N; 2°45'1.7''W) un macizo montañoso de naturaleza predominantemente carbonatada y localizado en el extremo sur oriental de la península ibérica en la provincia de Almería. Climatológicamente el área presenta valores medios de precipitación y temperatura anual media de 475 mm y 12°C, respectivamente. La precipitación tiene lugar fundamentalmente durante las estaciones de otoño e invierno, siendo el verano extremadamente seco.

El suelo presenta elevado contenido de materia orgánica (valor medio de 7%). El horizonte superficial "A" presenta una textura limo arcillosa mientras que el horizonte "B" presenta una textura arcillosa. De forma general la densidad aparente de los suelos es muy baja, siendo el valor medio para toda la ladera de 1.11 g cm⁻³. Es importante resaltar la importancia de la fracción gruesa en estos suelos que puede representar más del 30 ó 40% del volumen total de suelo y por lo tanto tener una influencia decisiva en la dinámica del agua (Oyonarte et al., 1998). El material original es una caliza dolomítica de color oscuro en láminas delgadas o capas masivas del Triásico medio. La pedregosidad es elevada y es frecuente la formación de pavimentos en superficie.

El tapiz vegetal esta constituido por una comunidad de degradación de porte medio y cobertura media-alta. La comunidad mejor representada es un lastonar donde predominan las especies *Festuca scariosa* (Lag.) Hackel (19%) y *Genista pumila* (Vierh) ssp. *pumila* (11.5 %). Acompañan *Hormatophylla spinosa* (L.) P. Kúpfer, (6.30 %), *Thymus serpylloides* Bory (5%), *Phlomis lychnitis* L. (3.3%) y otras como *Lavándula lanata* Boiss, *Salvia lavandulifolia* Vahl., y *Eryngium campestre* L. Esporádicamente y localizados en posiciones muy particulares (fondos de dolinas o microvalles) aparecen elementos propios de la comunidad serial como *Quercus rotundifolia*, *Crataegus monogyna*, *Juniperus oxycedrus* y *Asparagus acutifolius*. La altura media de la vegetación predominante es de 0.5 m llegando a alcanzar 1.5 m la especie *Festuca scariosa* durante la época de floración.

2.2 VARIABLES MEDIDAS E INSTRUMENTACIÓN

Para este estudio se midieron las siguientes variables meteorológicas y de estado del suelo: velocidad de viento, temperatura y humedad del aire, contenido de agua en el suelo, temperatura del suelo, radiación neta, flujo de calor al suelo, lluvia y flujo de la radiación incidente y reflejada fotosintéticamente activa. Los instrumentos empleados así como la frecuencia y altura de las mediciones se resumen en la Tabla 1. Los flujos de CO₂ y vapor de agua se midieron con el sistema *eddy covariance* instalado en una torre a 2.5 m (Tabla 1). El índice de área foliar se estimó de forma periódica para las cinco especies más abundantes mediante medidas de reflectancia realizadas con una cámara digital ADC (Dycam, Woodland Hills, CA, USA).

MEDIDAS	INSTRUMENTO	ALTURA (cm)
Sistema de eddy covariance (10 Hz)		
Densidad de CO ₂ y vapor de H ₂ O	Analizador de gases en el infrarrojo (Li-Cor 7500, Lincoln, NE, USA)	250
Fluctuaciones en la densidad de vapor de H ₂ O	Higrómetro de krypton (KH-20, Campbell Scientific, Logan, UT, USA)	250
Velocidad de viento (3D) y temperatura sónica	Anemómetro sónico (CSAT-3, Campbell Scientific, Logan, UT, USA)	250
Medidas meteorológicas y de estado del suelo (0.1 Hz)		
Temperatura del aire (T_a)	Termohigrómetro (HMP 35-C, Campbell Scientific, Logan, UT, USA)	150
Humedad relativa	Termohigrómetro (HMP 35-C, Campbell Scientific, Logan, UT, USA)	150
Flujo de radiación fotosintéticamente activa (PPFD, incidente y reflejada)	Sensores de PAR (Li-190, (Li-Cor 7500, Lincoln, NE, USA)	150
Radiación neta (R_n)	Radiómetro de neta (NR Lite, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands)	150
Contenido de agua en el suelo (SWC)	Reflectómetro (CS615 Campbell Scientific, Logan, UT, USA)	-15
Temperatura del suelo (T_g)	Termopares TCAV (Campbell Scientific, Logan, UT, USA)	(-1,-3,-5,-7)
Flujo de calor al suelo (G)	Palcas (HFP01, Hukseflux, Delft, Netherlands)	-8
Lluvia	Pluviómetro (785 M, Davis Instruments Corp., Hayward, CA, USA)	

Tabla 1. Lista de las variables medidas en “El Llano de los Juanes” incluyendo los instrumentos, la frecuencias de medida y la altura

Las densidades de CO₂ y vapor de agua se midieron con un sistema analizador de gases CO₂/H₂O en el infrarrojo (Li-Cor 7500, Lincoln, NE, USA). Este sistema se calibró mensualmente usando nitrógeno puro (99.999%) para la calibración del cero y una mezcla conocida de nitrógeno y CO₂ para la calibración de la pendiente. Las medidas eran almacenadas por un sistema de adquisición de datos (CR23X, CSI). Los promedios, varianzas y covarianzas de las medidas tomadas a una frecuencia de 10 Hz se calculaban y se almacenaban cada 15 minutos (Serrano-Ortiz 2008). Las medidas meteorológicas y de estado del suelo se realizaban cada 10 segundos y se almacenaban como promedios de 15 minutos. La corrección de los flujos de CO₂ y vapor de agua por variaciones en la densidad de aire (Webb et al. 1980) así como la rotación de coordenadas (McMillen 1988) y la conversión de los promedios de 15 minutos a promedios de media hora [siguiendo las reglas de Reynolds (Moncrieff et al. 1997)] se realizaban posteriormente.

2.3 ANÁLISIS REALIZADOS

a) Control de calidad y procesado de los flujos medidos

La acumulación de suciedad en las lentes del analizador de gases, como consecuencia de eventos de lluvia de barro (frecuentes en el Sur de la Península Ibérica) o deposición seca, subestima las mediciones en la densidad promedio de CO₂ (ρ_c). Esta variable se emplea para la corrección de los flujos de CO₂ y vapor de agua por variaciones en la densidad de aire (Webb et al. 1980) y genera un error sistemático y selectivo, que da lugar a una importante sobrestimación de la asimilación de CO₂ (Serrano-Ortiz et al. 2008). Para corregir este problema recurrimos al uso de instrumentación adicional que cuantifica la densidad de vapor de agua (ρ_v). Para ello, presentamos la relación existente entre los errores cometidos en ρ_c , como consecuencia de la contaminación de lentes (diferencias en ρ_c antes y después de la limpieza de las lentes del analizador) frente a los errores cometidos en ρ_v (comparando las medidas del analizador de gases con las obtenidas con un instrumento independiente, como el termohigrómetro. La dependencia determinada nos permite corregir esta subestimación en la densidad de CO₂.

Para realizar un control de calidad a los flujos obtenidos cada media hora se siguieron tres pasos:

1. Detección de los momentos en los que el sistema *eddy covariance* no funcionaba correctamente debido a problemas de instrumentación o condiciones meteorológicas adversas. Cuando el número de medidas tomadas por el analizador de gases es inferior al 75% de las 18000 medidas totales que deberían tomarse para el cálculo del promedio de flujo, se rechaza esa media hora.
2. Detección de momentos en los que el analizador de gases no funcionaba correctamente debido a deposición seca en las lentes o eventos de lluvia de barro. Se rechazan aquellas medias horas de flujo obtenidas cuando las lentes del analizador de gases están sucias. Este estado se puede determinar gracias a un parámetro de diagnóstico almacenado por el sistema de adquisición de datos que indica el estado de suciedad de las lentes (AGC).

3. Detección de momentos de ausencia de turbulencia. Se rechazan aquellas medias horas de flujo obtenidas en ausencia de turbulencia. Este estado se determina gracias a la velocidad de fricción. Cuando la velocidad de fricción es inferior a 0.2 m s^{-1} rechazaremos el valor de flujo obtenido (Gu et al. 2005).

b) Cobertura de datos y técnicas empleadas para el relleno de huecos en la variable de flujo de CO_2 (F_c).

A la vista de la figura 1 observamos que el mayor número de datos de F_c rechazados se corresponde al periodos de no turbulencia (velocidad de fricción $<$ de 0.2 m s^{-1}) y a deficiencias en el sistema de alimentación (largos periodos sin sol con el consiguiente problema de recarga de las baterías mediante los paneles solares o robo de baterías). De este modo, encontramos que los problemas de alimentación nos hacen perder un 30.5% del total de flujos medidos y la ausencia de turbulencia nos obliga a rechazar un 27.1%; como consecuencia de ello se ha rechazado un total de 57.6% datos de flujo durante los casi cuatro años de medidas.

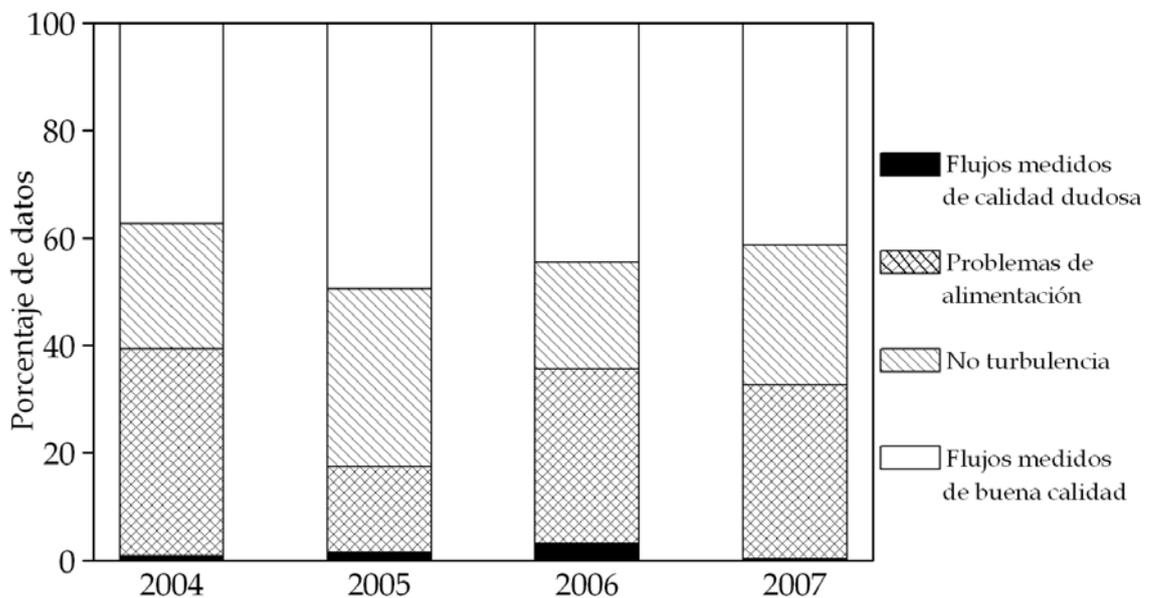


Figura 1. Resumen del porcentaje de cobertura de datos de flujo de CO_2 durante los cuatro años de medidas (desde Mayo de 2004 hasta Diciembre de 2007).

Estos periodos de ausencia de datos obligan al relleno de huecos para poder estimar el NEE de nuestro ecosistema de estudio. Dado que el relleno de huecos constituye el principal mecanismo causante de errores en el balance anual de carbono (Dragoni et al. 2007), para la estimación del balance de carbono en el Llano de lo Juanes (Sierra de Gádor, Almería) se han usado dos técnicas: redes neuronales (Papale y Valentini 2003; Ooba et al. 2006; Cazorla et al. 2008) y distribución marginal (Reichstein et al. 2005).

Distribución Marginal. Este proceso para el relleno de los valores de F_c se basa en la metodología publicada por (Falge et al. 2001), distinguiremos tres grandes grupos de datos:

1. Hay huecos en los valores de F_c pero no en las variables meteorológicas
2. Además de huecos en los valores de F_c tampoco hay información sobre la temperatura de aire (T_a) o el déficit de presión de vapor de agua (VPD) pero sí hay valores de radiación global (R_g).
3. Hay huecos en F_c y en las variables meteorológicas mencionadas anteriormente.

Para las situaciones incluidas en el grupo (1) el hueco de F_c se rellena con el valor promedio de F_c de los ± 7 días consecutivos al hueco, correspondientes a la misma hora, siempre y cuando se presenten condiciones meteorológicas similares. Diremos que habrá condiciones meteorológicas similares cuando los valores de T_a , VPD y R_g , para esa hora de ausencia de datos, no se desvíen durante estos ± 7 días, en más de 50 W m^{-2} , $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y 5.0 hPa respectivamente. Si no existen condiciones meteorológicas similares usaremos el valor promedio de F_c de ± 14 días consecutivos al hueco. Para el grupo (2) se usará también esta metodología pero considerando que existen condiciones meteorológicas similares cuando el valor de R_g no se desvíe en más de 50 W m^{-2} . Los huecos comprendidos en el grupo (3) se rellenarán con el promedio de F_c en el mismo momento del día (± 1 hora), iniciaremos este proceso usando los valores de F_c de ± 0.5 días consecutivos y ampliaremos el valor de esta ventana hasta que podamos rellenar el hueco. Esta herramienta de relleno es accesible a través de Internet en la siguiente dirección: <http://gaia.agraria.unitus.it/database/eddyproc/index.html>

Redes neuronales. Las redes neuronales se componen de una serie de algoritmos que emulan el comportamiento básico de las neuronas. El objetivo esencial de esta

metodología es la obtención de los valores de una variable de salida, mediante la aplicación de modelos no lineales (Ooba et al. 2006). Para ello, se usan unas variables de entrada denominadas neuronas o fuentes. Estas variables se combinan entre ellas y se realiza una serie de operaciones internas para la obtención de los valores de la variable de salida. Entre todas las redes neuronales destacamos las de base radial por ser las utilizadas en este estudio.

En la aplicación de las redes neuronales para el relleno de huecos, destacamos dos etapas: la fase de entrenamiento y la fase de obtención del resultado y test. Para ello dividimos los datos correspondientes a las variables de entrada en dos subconjuntos: el conjunto de entrenamiento y el conjunto de test. La red de base radial aprende la forma de la función con un conjunto de entrenamiento, después de algunos intentos, con diferentes variables de entrada, la red se ajusta a la función y utiliza un conjunto independiente para evaluar el ajuste.

Para la aplicación de las redes neuronales en el relleno de huecos de los flujos de CO_2 en nuestro ecosistema de estudio, se han seleccionado las siguientes variables de entrada: Función de transformación del día, mes y hora (Papale y Valentini 2003), temperatura del aire y el suelo (T_a y T_s respectivamente), dirección de viento (WD), velocidad de viento (WS), radiación neta (R_n), densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos (PPFD), humedad relativa (HR), velocidad de fricción (u^*), contenido de agua en el suelo (SWC) y el déficit de presión de vapor (VPD).

Una vez establecidas las variables de entrada, dividiremos el conjunto de datos de F_c en tres partes. Las dos terceras partes de este conjunto (11719 datos) de datos se usarán para el entrenamiento de la red y una tercera parte (5860 datos) se usará como subconjunto de test. Para hacer que todas las variables de entrada partan con un mismo peso los datos se normalizan aplicando una función de tal manera que los valores de estas variables estén comprendidos entre -1 y 1 (Papale y Valentini 2003). Este sistema es capaz de determinar las variables de las que depende nuestra variable de salida, pero es incapaz de establecer un modelo matemático que nos permita analizar su comportamiento.

Los momentos de ausencia de datos de las variables de entrada de la red se rellenan con instrumentación complementaria o mediante la técnica publicada por Falge et al. en 2001: cuando hay ausencia de datos de sólo una media hora se rellena con el valor promedio del dato de la media hora anterior y posterior al hueco. Si el hueco es superior a media hora pero inferior a dos horas se rellena esta ausencia con una regresión lineal, tomando la media hora superior e inferior al hueco como puntos de la recta. Los huecos superiores a dos horas se rellena, tomando como valor el promedio de los 7 días anteriores y posteriores para esa media hora. De forma excepcional el periodo comprendido entre el 5 de Noviembre de 2006 y el 15 de Febrero de 2006 no fue relleno.

Para análisis posteriores es conveniente seleccionar una de las dos técnicas de relleno (redes neuronales o distribución marginal). Para seleccionar la más apropiada se han comparado ambas técnicas creando huecos artificiales en el conjunto de datos y comparando los flujos medidos con los flujos rellenos con ambas técnicas. De este modo se ha seleccionado al azar un mes de datos durante la época de crecimiento biológico y otro mes durante la época de sequía (Junio de 2004 y Septiembre de 2006 respectivamente) y se ha creado un hueco artificial para cada mes que comprende el 75% de los datos medidos. Para comparar ambas técnicas se ha usado la pendiente de la correlación lineal entre los datos medidos y los datos rellenos, el coeficiente de determinación (R^2), el error residual (ϵ) y el error cuadrático medio (RMSE) (Tabla 2).

Método	Hueco artificial	Pendiente	R²	ϵ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	RMSE ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
Red neuronal	Junio 2006	0.89	0.71	-0.04	1.07
	Septiembre 2004	0.83	0.56	-0.12	2.77
Distribución Marginal	Junio 2006	0.90	0.52	0.10	2.58
	Septiembre 2004	0.92	0.29	-0.08	1.82

Table 2 Comparación estadística entre la técnica de red neuronal y distribución marginal para el relleno de huecos de la variable de flujos de CO_2 . Para esta comparación se ha usado la pendiente de la correlación lineal entre los datos medidos y los datos rellenos, el coeficiente de determinación (R^2), el error residual (ϵ) y el error cuadrático medio (RMSE).

A pesar de que la pendiente de la regresión entre los datos medidos y los datos rellenos es mayor usando la técnica de distribución marginal, observamos que las redes neuronales son superiores a la hora de explicar la variabilidad de los datos y comparar el error residual. Por otro lado, el error cuadrático medio favorece la técnica de redes neuronales en Junio de 2006 y la distribución marginal en Septiembre de 2007. Teniendo en cuenta estos factores hemos seleccionado las redes neuronales como técnica para el relleno de huecos en F_c en la gran mayoría de los análisis posteriores.

3. RESULTADOS

3.1 CONDICIONES METEOROLÓGICAS

La Figura 2 muestra la variabilidad anual y estacional de las condiciones meteorológicas. La temperatura del aire (T_a) y la densidad de flujo de fotones incidentes fotosintéticamente activos (PPFD_d) siguen un patrón sinusoidal durante el periodo de medidas. La T_a promedio fue 11.3, 12.9 and 11.6 °C en 2005, 2006 y 2007 respectivamente (Fig 2A). Los valores máximos de PPFD_d se observaron a principios de verano alcanzando valores promedio diarios superiores a 700 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; los valores mínimos de PPFD_d se midieron durante enero ($<30 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Fig. 2B). A lo largo del periodo de medida, la lluvia y la radiación fotosintéticamente activa se encuentran en oposición de fase. Las precipitaciones se producen fundamentalmente a finales de otoño y en invierno, cuando PPFD_d alcanza los valores más pequeños. La precipitación anual fue 373, 168, 411 y 251 mm en 2004, 2005, 2006 y 2007 respectivamente (Fig. 2C). Teniendo en cuenta los momentos de ausencia de lluvia y los periodos en los que el contenido de agua en el suelo (SWC) es inferior a 15% podemos definir periodos en los que nuestro ecosistema presenta deficiencias hídricas (épocas de verano y principio de otoño) (Fig. 2C).

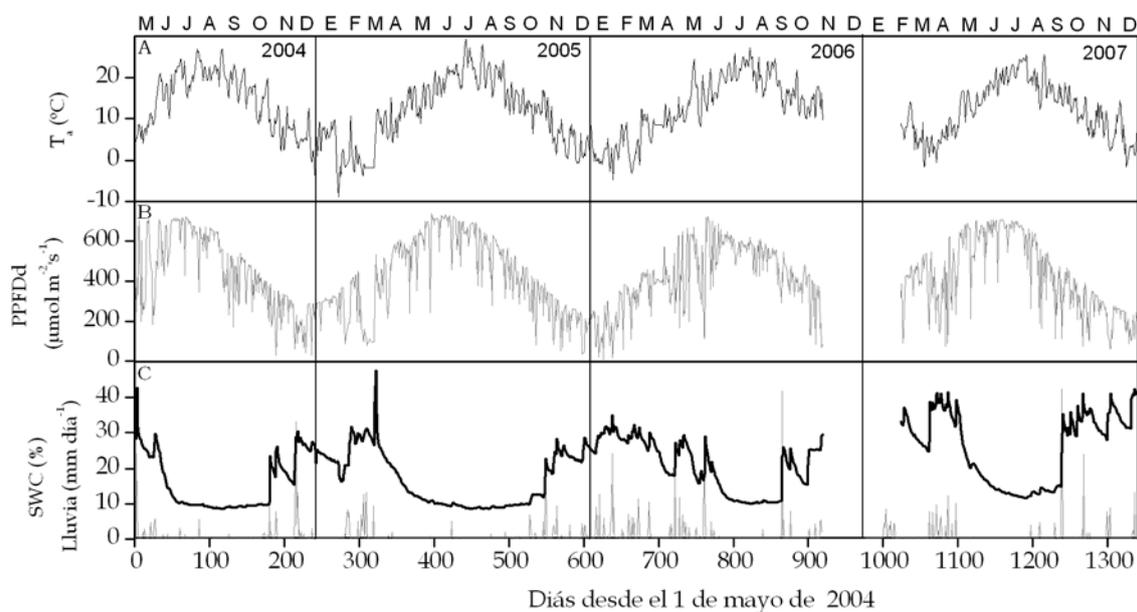


Figure 2. Promedio diario de las condiciones ambientales en “El Llano de los Juanes” desde mayo de 2004 a diciembre de 2007. (A) Temperatura del aire, T_a . (B) Densidad de flujo de fotones incidente, PPFD_d. (C) Contenido volumétrico de agua en el suelo, SWC (línea negra) y lluvia total (línea gris).

Durante la época de medida aparecen diversos eventos meteorológicos extremos. Un periodo de intensas lluvias previas a la instalación del sistema de *eddy covariance* en primavera de 2004 (373 mm en sólo dos meses) y que llegó a superar la precipitación anual de 2005 o 2007. Además destacamos las temperaturas extremas sufridas en invierno de 2005 (promedios diarios de T_a de -8.9 °C, en enero y temperaturas templadas en febrero) y la sequía extrema de 2005 [más de 50 días sin lluvia (del 10 de abril de 2005 al 30 de mayo) cinco meses con $SWC < 15\%$] que han podido causar daños permanentes a la vegetación (Pockman y Sperry 1997; Jones 2000; Resco et al. 2008). Finalmente destacamos los episodios de nieve durante el invierno de 2004/05 en los que el suelo permaneció cubierto de nieve casi 20 días. Estos eventos extremos han podido causar daños al ecosistema alterando el ciclo del carbono

3.2 INTERCAMBIOS DE CARBONO

a) Comportamiento de los intercambios de carbono

La figura 3 muestra la cantidad de carbono emitido por el ecosistema durante el periodo de estudio usando los métodos de redes neuronales y distribución marginal para el relleno de la variable F_c (intercambio de carbono en $g\ m^{-2}\ día^{-1}$). El llano de los Juanes se comporta como un sumidero de carbono durante la primavera (valores negativos) y como una fuente de carbono durante el verano (valores positivos) con un patrón muy similar independientemente del método empleado para el relleno de huecos. No obstante, es importante señalar ciertas diferencias. En mayo de 2004 el ecosistema captura carbono si el método empleado para el relleno es el de distribución marginal ($1.5\ g\ C\ m^{-2}$ por día aproximadamente) mientras que en el caso de relleno con redes neuronales el ecosistema es neutro. Del mismo modo, en febrero de 2005 se observa un pico en las captaciones de carbono por el ecosistema ($1.7\ g\ C\ m^{-2}$) que no aparece si el método empleado para el relleno es la distribución marginal; este momento se corresponde con un periodo del invierno en el que se observaron altas temperaturas diarias y alto contenido de agua en el suelo ($10^\circ C$ y 30% respectivamente; Fig. 2). Además, en junio de 2007 la captación de carbono detectada con la técnica de redes neuronales es tres veces superior (aproximadamente $1.5\ g\ C\ m^{-2}$ por día) a la obtenida con el método de distribución marginal. Finalmente, el balance anual promedio de carbono durante el periodo de medida fue de -3 ± 16 y $0 \pm 30\ g\ C\ año^{-1}$ usando cómo

método de relleno de huecos las redes neuronales y la distribución marginal respectivamente. No obstante, a pesar de este buen acuerdo en técnicas, usaremos de ahora en adelante el método de redes neuronales para los posteriores análisis.

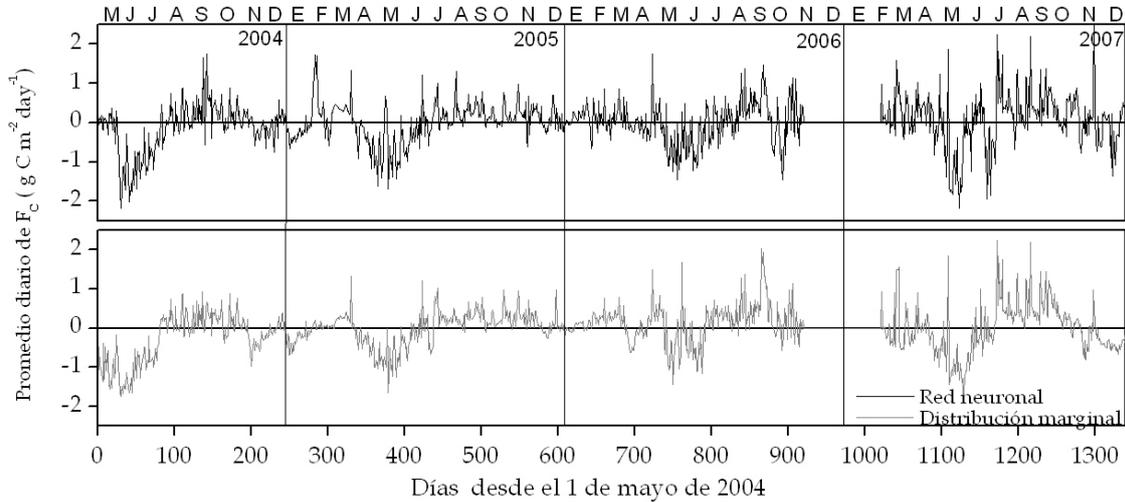


Figura 3. Promedio diario de flujo de carbono emitido por “El Llano de los Juanes” desde mayo de 2004 hasta diciembre de 2007, usando dos métodos distintos para el relleno de huecos de esta variable: Redes neuronales (línea negra) y distribución marginal (línea gris)

Como se mencionó en la introducción, una reciente publicación (Kowalski et al. 2008) demostró que los procesos de disolución de carbonatos (procesos geoquímicos) pueden llegar a dominar los intercambios de CO_2 entre el ecosistema y la atmósfera durante épocas de sequía. Por esta razón, es interesante dividir los intercambios de carbono en periodos en los que los procesos geoquímicos dominan estos intercambios (de ahora en adelante época geoquímica) y en periodos donde los procesos biológicos de fotosíntesis y respiración dominan los intercambios (de ahora en adelante época biológica). Así, se consideraron periodos geoquímicos a aquellos momentos de sequía ($\text{SWC} < 15\%$) con una razón de Bowen (razón entre el flujo de calor sensible y latente (H/LE)) superior a 4. Durante este periodo la gran mayoría de la vegetación está en senescencia y por tanto la fotosíntesis y la respiración se reducen considerablemente. Así mismo, se consideraron periodos biológicos a aquellos momentos en los que la razón de Bowen era inferior a 4 y el promedio diurno de temperatura del aire superior a 4°C (Serrano-Ortiz et al. 2007). Aquellos días que no cumplen las condiciones establecidas para corresponderse a periodos geoquímicos o biológicos se consideran periodos en los que los procesos que dominan los intercambios de carbono no están claros (época indeterminada).

La tabla 3 muestra el promedio diario de variables meteorológicas y fenológicas relacionadas con los intercambios de carbono (F_c) durante la época biológica (3a) y la época geoquímica (3b) de 2004 hasta el 2007. Estas variables se seleccionaron mediante un análisis de componente principales (PCA). Además, esta tabla muestra el intercambio total de carbono (NEE), la duración y el promedio diario de F_c durante las épocas biológicas y geoquímicas para cada año.

a) Periodos con flujos de carbono de dominancia biológica							
	PPFDd ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ET ($\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	NEE (g m^{-2})	Duración (días)	F_c ($\text{g m}^{-2} \text{día}^{-1}$)	LAI ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
2004	530± 170	14.0± 8.9	16± 7	-57	160	-0.36	1.13
2005	480± 190	9.5 ± 5.3	13± 7	-42	195	-0.22	0.92
2006	440± 50	11.4± 7.1	14± 6	-31	214	-0.14	-
2007	390± 180	8.1 ± 4.7	10± 5	-21	197	-0.11	1.18

b) Periodos con flujos de carbono de dominancia geoquímica							
	PPFDd ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ET ($\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	NEE (g m^{-2})	Duración (días)	F_c ($\text{g m}^{-2} \text{día}^{-1}$)	u^* ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
2004	420± 120	4.3± 2.5	17± 4	14	62	0.23	0.3± 0.2
2005	460± 130	4.6± 2.7	17± 4	22	98	0.23	0.2± 0.1
2006	500± 70	5.3± 2.2	20± 3	13	30	0.43	0.2± 0.1
2007	530± 150	5.8± 2.7	20± 4	34	67	0.51	0.3± 0.1

Tabla 3. Promedio diario de algunas variables meteorológicas [densidad de flujo de fotones incidentes (PPFD_d, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), evapotranspiración (ET, $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), y temperatura del aire (T_a , $^{\circ}\text{C}$)]; intercambio total de carbono (NEE, g m^{-2}), duración (días) y promedio diario de flujo de CO_2 (F_c , $\text{g m}^{-2} \text{día}^{-1}$) durante las épocas biológicas (a) y geoquímicas (b) para cada año. El índice de área foliar a nivel de ecosistema (LAI, m^2 de vegetación por m^2 de área total) en mayo (época biológica) y la velocidad de fricción (u^* , m s^{-1}) en épocas geoquímicas también se incluyen.

La figura 4 muestra la tendencia diurna de F_c ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) durante la época biológica (figure 4A) y geoquímica (figure 4B). En la figura 4A (época biológica) observamos que el ecosistema captura carbono desde las 6:00 de la mañana hasta las 19:00 de la tarde, alcanzando valores máximos de captación a las 8:00 GMT con un decrecimiento a las 12:00 GMT. Los valores más elevados de captación de carbono por parte del ecosistema se observaron en 2004 con un pico de $-2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por la mañana y otro pico de $-1.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por la tarde. Los valores de promedio diario de PPFDd y T_a

fueron también más altos si los comparamos con otros años ($530 \pm 170 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y 16 ± 7 respectivamente), el índice de área foliar (LAI) era de $1.13 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ (Tabla 3a). En 2005 el LAI decrece un 19% ($0.92 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$) comparado con 2004 y los valores pico de captación de carbono se reducen un 40% (al igual que en 2006). En 2007, a pesar de que los valores de LAI son superiores a 2004 ($1.18 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$), los valores pico de captación decrecen un 25%; el promedio diario de PFDd y T_a fueron un 25% y 60% más bajos respectivamente ($390 \pm 180 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $10 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Durante la noche las emisiones de CO_2 son muy parecidas entre años; los valores más bajos de emisiones de CO_2 se observan en 2005 (menos de $0.3 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y los valores más altos en 2006 (más de $0.5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; Fig. 6A). En este contexto observamos que el intercambio total de carbono (NEE) durante la época biológica de 2004 (datos medidos y rellenos) fue casi tres veces superior al valor obtenido en 2007 con una duración de 160 y 197 días respectivamente. En 2005 y 2006 los valores de NEE son muy similares (42 g m^{-2} y 31 g m^{-2} respectivamente) mientras que la duración del periodo biológico es 20 días superior en 2006. El promedio diario de captación de carbon va desde los $0.36 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ en 2004 hasta los $0.11 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ en 2007.

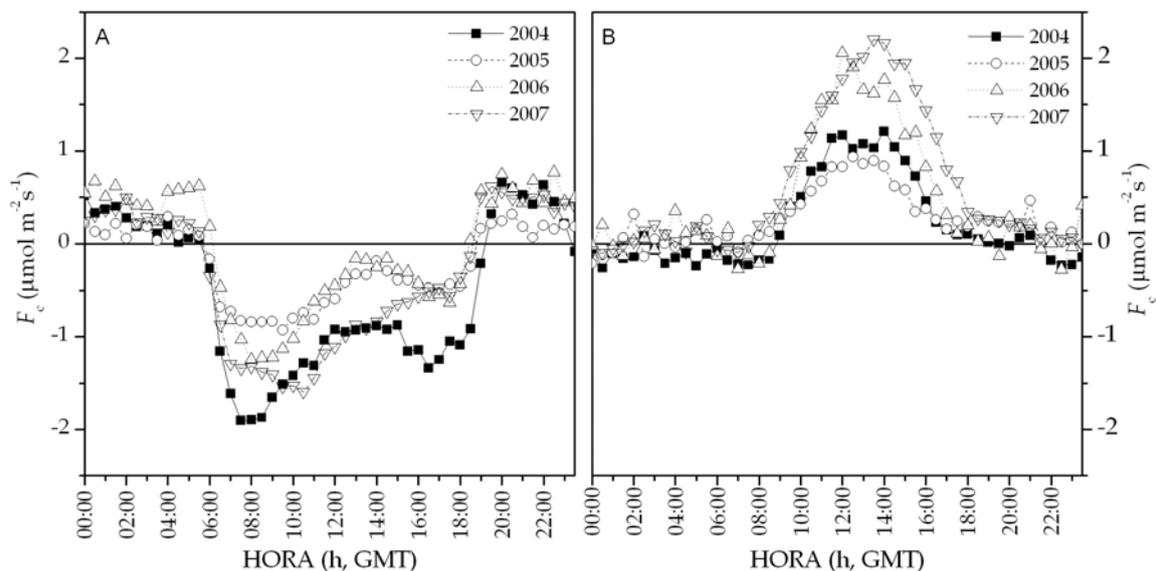


Figura 4. Tendencia diaria de F_c ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) durante la época biológica (figura 4A) y geoquímica (figura 4B) (desde 2004 to 2007). Durante la época biológica los procesos de respiración y fotosíntesis dominan estos intercambios de CO_2 , mientras que durante la época geoquímica los intercambios de CO_2 están dominados por procesos de ventilación del suelo y precipitación de carbonatos.

La figura 4B muestra la tendencia diurna de F_c ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) durante las épocas geoquímicas para los años de 2004 a 2007. Durante este periodo observamos emisiones de CO_2 que siguen un patrón simétrico y que presentan un pico de emisión justo después del medio día (13:00 GMT). Durante la noche, el intercambio de CO_2 es prácticamente nulo. En 2004 y 2005, con un promedio diario de PPFD_d inferior a $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, un promedio diario de ET de aproximadamente $4.4 \pm 2.6 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y un promedio diario de T_a de $17 \pm 4^\circ\text{C}$, Las emisiones de CO_2 no alcanzan el valor de $1.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. En 2006 y 2007, las emisiones diarias de CO_2 se incrementan un 40% comparado con los años anteriores; el promedio diario de PPFD_d y ET decrece un 20% y T_a se incrementa en 3°C . En este contexto, a pesar de que la duración del periodo geoquímico es 31 días superior en 2005 que en 2007, el NEE es un 50% superior en este último año (34 g C m^{-2}) (tabla 3b). En 2004 el NEE fue 14 g C m^{-2} con una duración del periodo geoquímico de dos meses. En 2006 el NEE fue muy similar a pesar de que la duración del periodo fue únicamente de un mes. El flujo promedio de carbono fue de $0.23 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en 2004 y 2005, doblándose dicho valor en 2006 y 2007 (0.43 y $0.51 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ respectivamente).

Finalmente, durante periodos de dominancia de procesos indeterminada, la tendencia diurna de F_c no presenta un claro patrón. Desde 2004 a 2006 se observa ligeras emisiones de CO_2 durante el día (normalmente inferiores a $0.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y prácticamente 0 en el 2005), mientras que en 2007 se observa una ligera captación de carbono por parte del ecosistema (valores inferiores a $0.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). La duración de estos periodos es inferior a dos meses para cada año y el promedio diario de flujo de carbono es inferior a $0.2 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (información no presentada en gráfica y/o tabla).

b) Balance interanual de carbono

La figura 5A muestra el carbono acumulado perdido (emitido) por el ecosistema usando las redes neuronales como método para el relleno de huecos. Desde que se instaló en sistema de *eddy covariance* en Mayo de 2004 (día uno de la figura 4A) hasta principios de agosto de 2004 (día 93) el ecosistema se comportó como sumidero de carbono capturando un total de 59 g C m^{-2} . Posteriormente, durante el periodo de sequía de 2004 (desde el día 93 hasta el 200), con un promedio diario de temperatura superior a 15°C y

escasos eventos de lluvia (precipitaciones inferiores a 5 mm) por día, el ecosistema emitió 26 g C m⁻². Durante el otoño de 2004 hasta el invierno de 2004/05 (día 200 hasta 280), a pesar de que el PPF_d alcanzó los valores más bajos (valores promedio diarios inferiores a 300 μmol m⁻²) y la T_a promedio diaria fue inferior a 10°C, el ecosistema absorbió 13 g C m⁻². Posteriormente, el ecosistema perdió 19 g C m⁻² durante 54 días. Tras las lluvias en invierno de 2005, la estación de crecimiento biológico comenzó en abril con un T_a promedio superior a 10°C, y una captación de carbono de 47 g m⁻² hasta junio de 2005. Más tarde, desde Julio de 2005 hasta abril de 2006 el ecosistema actuó como fuente de carbono perdiendo 43 g C m⁻². Tras este largo periodo, el ecosistema se convirtió de nuevo en sumidero de carbono captando 32 g m⁻² durante la estación de crecimiento de 2006 (días 721 hasta 817). Desde agosto de 2006 hasta abril de 2007 (día 818 hasta 1100) el ecosistema se comportó fundamentalmente como fuente de carbono emitiendo 42 g m⁻². A continuación, la estación de crecimiento de 2007 se prolongó hasta mayo de 2007 y el ecosistema captó 39 g C m⁻². Finalmente, el ecosistema tornó a fuente de carbono emitiendo 49 g C m⁻² durante el verano y el otoño de 2007.

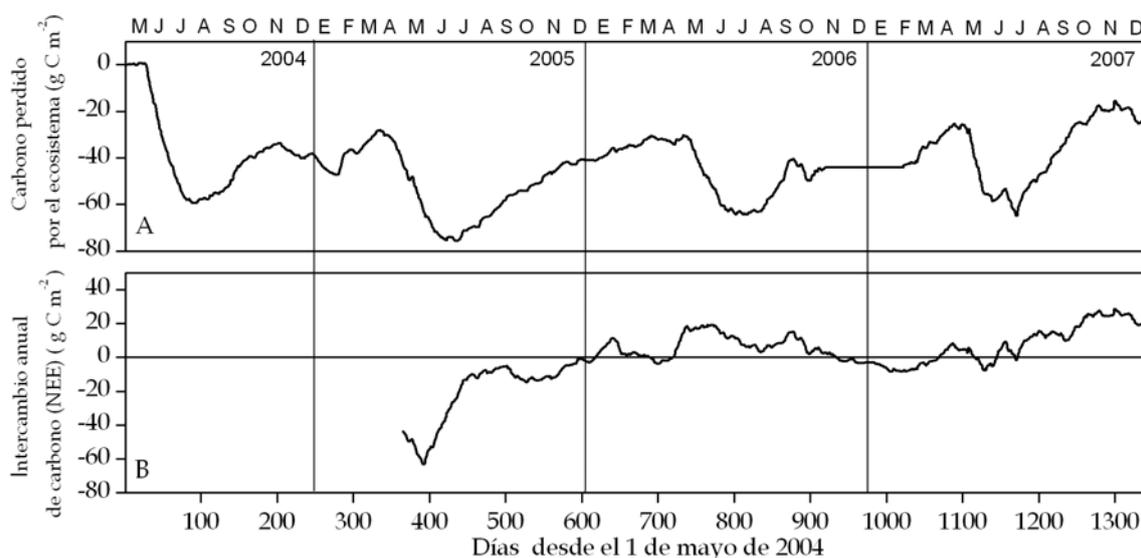


Figura 5. Tendencia temporal del carbono perdido por el ecosistema de “El Llano de los Juanes” durante el periodo de estudio. (A) A carbono perdido acumulado (g m⁻²), (B) intercambio anual de carbono (g m⁻²).

El balance anual de carbono dependerá del periodo que escojamos para su cálculo. De este modo, la figura 5B muestra el balance anual de carbono en función del día final del

año. Durante el primer año de medidas (desde el 1 de mayo de 2004 hasta el 20 de abril de 2005) el balance anual de carbono fue de -44 g C m^{-2} (sumidero). A partir de este año de medidas nuestro ecosistema siguió actuando como sumidero anual de carbono hasta principios de 2006. A partir de esta fecha el ecosistema se comportó como fuente anual de carbono o ligero sumidero (balance anual superior a -10 g C m^{-2}) alcanzando los valores anuales mas altos de fuente de carbono durante el periodo del 21 de noviembre de 2006 hasta el 20 de noviembre de 2007 (29 g C m^{-2}).

La figura 6 muestra el intercambio mensual de carbono y la precipitación total durante el periodo de estudio. Durante la primavera de cada año, inmediatamente después de las lluvias de mayo de 2004, febrero y marzo de 2005, marzo y abril de 2006 y abril de 2007, el flujo promedio mensual de carbono es de -19.8 , -15.2 , -15.4 y $-26.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$ respectivamente (sumidero). No obstante, la duración del periodo en el que el ecosistema actuó como sumidero varió en función de los años (tres meses en 2004 y 2005, dos meses en 2006 y un mes en 2007). En verano, los eventos de lluvia fueron poco frecuentes (lluvia mensual inferior a 10 mm) y el ecosistema pasa a convertirse en fuente de carbono a principios de julio o en agosto, dependiendo del año. La duración del periodo en el que el ecosistema se comportó como fuente fue de tres meses en 2004, cinco meses en 2005, dos meses en 2006 y cuatro meses en 2007. El promedio mensual de flujo de carbono fue de 7.9 , 6.4 , 9.8 y 9.0 g C m^{-2} para los cuatro años respectivamente. Durante el otoño y el invierno, a pesar de la existencia de importantes eventos de lluvia el promedio mensual de flujo de carbono fue muy próximo a 0.

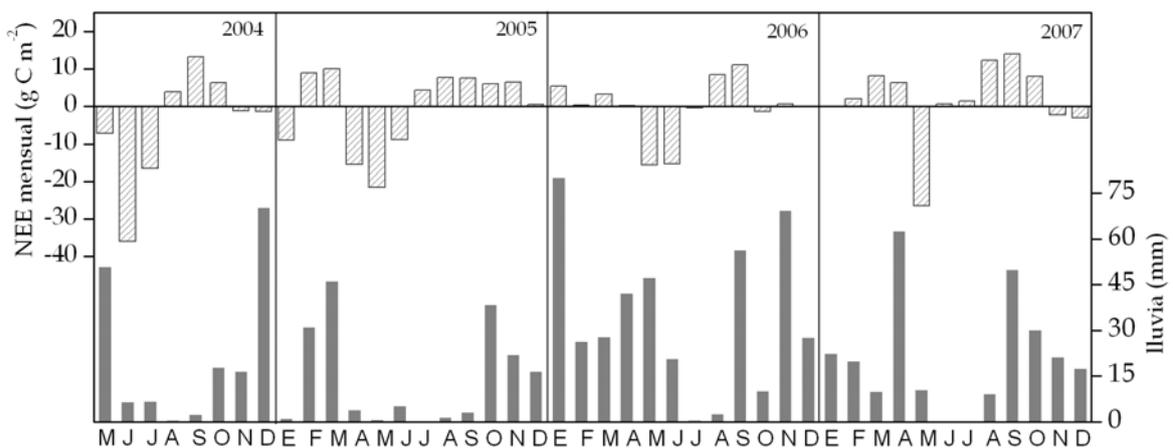


Figura 6. Cantidad de carbono mensual emitido por el ecosistema (barras blancas) y precipitación mensual (barras negras) desde mayo de 2004 hasta diciembre de 2007.

4. DISCUSIÓN

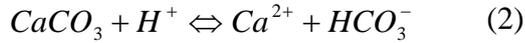
Este estudio es una primera aproximación de la estimación del balance interanual de carbono de un ecosistema sobre suelo carbonatado, donde los procesos biológicos interaccionan con los procesos geoquímicos afectando al ciclo del carbono. Debido a la complejidad de este ecosistema, los métodos tradicionales de rellenos de huecos basados en la descomposición del flujo de carbono en fotosíntesis y respiración (Falge et al. 2002) no pueden ser aplicados. Por este motivo, se han usado dos técnicas estadísticas para el relleno de huecos: las redes neuronales (Cazorla et al. 2008) y la distribución marginal (Reichstein et al. 2005). Como resultado de la aplicación de estos dos métodos observamos que el balance promedio anual es muy similar independientemente del método empleado (-3 ± 16 y 0 ± 30 g C año⁻¹ respectivamente). No obstante se detectaron algunas discrepancias que coincidían con eventos meteorológicos extremos: las abundantes lluvias de mayo de 2004 y un mes de febrero de 2005 relativamente cálido. Este desacuerdo se debe a la incapacidad del modelo de distribución marginal de responder frente a eventos meteorológicos anómalos. La técnica de distribución marginal reemplaza los valores de flujo de CO₂ rechazados o no medidos, con valores promedio de flujo de ± 14 días (o ± 7 días) durante la misma media hora. Mientras que las redes neuronales usa variables meteorológicas como elementos de entrada para la obtención de los flujos de CO₂ a partir de una función. No obstante es importante señalar que, dado que las variables meteorológicas son usadas de entrada en el modelo, es necesario el relleno de huecos de estas variables. De este modo, durante largos periodos de ausencia de datos (desde noviembre de 2006 hasta el 15 febrero de 2007) el relleno de huecos es inviable.

Además, este estudio representa una primera aproximación en la descomposición de los intercambios de CO₂ sobre suelos carbonatados en flujos de CO₂ de procedencia geoquímica o biológica. Esta división preliminar es un primer paso para determinar la contribución en el balance anual de carbono de ambos procesos así como para analizar el efecto de la variabilidad meteorológica y fenológica sobre la variabilidad interanual de estos intercambios de carbono y estos procesos (figura 4 y tabla 3). Durante los periodos en los que el intercambio de carbono está dominado por los procesos de fotosíntesis y respiración (periodo biológico; Razón de Bowen < 4 y promedio diurno de

$T_a > 4^\circ\text{C}$) se encontró que la variabilidad interanual en las tendencias del F_c medido eran consecuencia del LAI fundamentalmente y del PPF D_d y la temperatura. En este sentido se observó que los valores más altos de captación de carbono se midieron en el año 2004 cuando el valor del LAI era de $1.13 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. En 2007, con valores de LAI similares pero con un descenso de un 20% y 60% en el PPF D_d y la T_a respectivamente la captación de carbono por parte del ecosistema se redujo en más de un 20%. Durante la noche los valores de emisión de carbono eran muy similares en 2004 y 2007. En 2005, el promedio diario de captación de carbono se redujo más de un 50% como consecuencia de una reducción en el LAI de un 20% comparado con 2004. Esta reducción en el LAI pudo deberse a los daños permanentes ocasionados a las plantas durante el frío invierno de 2005 (Pockman y Sperry 1997). Se observa además que no existe relación entre la duración del periodo biológico y el total de carbono asimilado por el ecosistema durante ese periodo; este hecho podría deberse a un incremento en la respiración del ecosistema (Dunn et al. 2007). Comparando el periodo biológico del año 2006 con el año 2005 observamos que la captación total de carbono durante este periodo se reduce un 30% como consecuencia de un incremento en las emisiones de CO_2 que se hacen más presentes durante la noche (la respiración se incrementa un 40% como consecuencia de un incremento de 3°C en la temperatura del aire durante la noche). El año 2007 puede considerarse un caso particular en el que a pesar de que la tendencia diaria del F_c medido es un 15% superior a los dos años anteriores, el total de carbono asimilado por el ecosistema se redujo un 50%. Esto podría deberse a la alta proporción de ausencia de medidas de F_c durante la noche (>80%). El relleno de estos huecos mediante las redes neuronales consideraba que estos valores de emisiones de CO_2 excedían los $2 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ produciéndose un descenso en la asimilación de carbono total durante el periodo.

Durante los periodos en los que el intercambio de carbono está dominado por los procesos geoquímicos (periodo geoquímico; Razón de Bowen < 4 y SWC < 15%), los fenómenos de ventilación extraen CO_2 de las cavidades subterráneas dando lugar a emisiones de carbono (Kowalski et al. 2008). Durante estos periodos observamos que la variabilidad interanual en la tendencia del F_c medido está relacionada con la ET fundamentalmente. En 2006 y 2007, el promedio diario de emisiones de CO_2 se incrementó un 50% si lo comparamos con el año 2004 y 2005, esta tendencia coincide con un descenso en el promedio diario de ET y T_a de un 20% y un 15%

respectivamente. Durante este periodo, la precipitación de los bicarbonatos supone una fuente adicional de CO₂ en el suelo.



La ET, extrae agua del suelo y empuja las ecuaciones (1) y (2) a la izquierda dando lugar a emisiones de CO₂ (Emmerich 2003). Finalmente, al igual que en los periodos biológicos observamos que no existe relación entre la duración del periodo geoquímico y el carbono total emitido por el ecosistema. En 2004 y 2007 la duración del periodo fue similar y la contribución de estos procesos geoquímicos sobre el balance anual de carbono fue un 19% y un 68% respectivamente. En 2006 y 2005 la duración del periodo geoquímico fue de tres meses aproximadamente y la contribución de estos procesos al balance anual de carbono fue de un 23% y un 19% respectivamente.

No obstante, destacamos que esta división preliminar del intercambio de carbono en periodos biológicos y geoquímicos no garantiza la inexistencia de procesos geoquímicos durante periodos biológicos y viceversa. Por ejemplo, durante el periodo biológico, la respiración del suelo incrementa la presión parcial de CO₂, este CO₂ se disuelve en el agua y percola. Estos procesos dan lugar a fenómenos de disolución de la roca carbonatada consumiendo CO₂ e incrementando el Ca²⁺ y el HCO₃⁻ en la fase acuosa (Liu y Zhao 2000). Así mismo, durante periodos geoquímicos, consideramos que la gran mayoría de las plantas están en senescencia y la respiración autotrófica puede despreciarse así como la respiración heterótrofa (Eliasson et al. 2005). Es más, aquellos periodos en los que el proceso dominante es indeterminado no se incluyen en nuestros análisis. De este modo, es necesario encontrar otras metodologías capaces de dividir los intercambios de CO₂ en su componente geoquímica y biológica.

Teniendo en cuenta la existencia de modelos biológicos (Krinner et al. 2005) capaces de simular los procesos de fotosíntesis y respiración así como la existencia de modelos geoquímicos (Goddéris et al. 2006) que simulan los procesos de precipitación y disolución de carbonatos; un nuevo modelo biogeoquímico acoplando ambos procesos puede ser la solución a una división más fiable de la contribución de la biología y la geoquímica en los intercambios de carbono. De igual modo, los isótopos estables del

carbono pueden emplearse para discernir entre los diferentes procesos que intervienen en los intercambios de carbono mediante análisis isotópicos (Yakir y Sternberg 2000; Flanagan et al. 2005). Finalmente, las medidas de intercambio de CO₂ y vapor de agua a escala de hoja podría usarse para estimar la contribución de la fotosíntesis y la respiración autótrofa en los intercambios de carbono a escala de ecosistema así como determinar la duración de los periodos de senescencia.

En los ecosistemas mediterráneos sobre suelo carbonatado, la cantidad de precipitación así como la distribución de la misma a lo largo del año juega un papel esencial en los intercambios de carbono. Al igual que otros ecosistemas de vegetación dispersa y suelo desnudo, la cuantificación de los eventos de lluvia durante la primavera son mucho más importantes la precipitación total o las lluvias en invierno, ya que esta lluvia primaveral es la que determina la duración del periodo de crecimiento biológico (Hunt et al. 2004; Huxman et al. 2004). En estos ecosistemas la captura de carbono por el ecosistema está relacionada con la activación de la fotosíntesis tras las lluvias de primavera. No obstante, en ecosistemas con suelo carbonatado estas lluvias no solo activan la fotosíntesis sino que también dan lugar a procesos de disolución de carbonatos (consumiendo CO₂, ver ecuación 1 y 2) que contribuye al papel del ecosistema como sumidero de CO₂ durante este periodo (Gombert 2002; Emmerich 2003). En épocas de sequía observamos emisiones de CO₂ algo más pequeñas que en otros ecosistemas de suelo carbonatado (Hasting et al. 2005). Estas emisiones estarían relacionadas con la precipitación de los carbonatos (emitiendo CO₂) ya que la respiración microbiana durante la sequía es mínima (Emmerich 2003). No obstante no se descarta la posible existencia de pulsos de respiración tras eventos de lluvia durante la época de sequía (Noy-Meir 1973; Schwinning y Sala 2004).

Finalmente, tras casi cuatro años de medidas continuas con un sistema eddy covariance, podemos concluir que el ecosistema de matorral sobre suelo carbonatado localizado en la Sierra de Gádor (Almería) presenta un balance anual de carbono que oscila entre los -63 to 29 g C m⁻². Estos valores son consistentes con otros estudios similares llevados a cabo sobre suelo carbonatado (Tabla 4).

Ecosistemas carbonatados	Ubicación	Año(s)	T (°C)	Lluvia (mm)	NEE (g C m ⁻²)
Matorral (<i>este estudio</i>)	Sierra de Gádor (Sureste de España)	2004-2007	12	277	(-63)-29
Desierto de matorral (<i>Hansting et al., 2005</i>)	Baja California (Méjico)	2002-2003	24	158	-45
Matorral semiárido (<i>Emmerich, 2003</i>)	Sureste de Arizona (USA)	1997-2000	17	356	144
Pastizal semiárido (<i>Emmerich, 2003</i>)	Suereste de Arizona (USA)	1997-2000	17	356	126
Desierto con pastizal (<i>Mielnick et al., 2005</i>)	Las Cruces (Nuevo Méjico)	1996-2001	-	272	145
Desierto de Mojave (<i>Wohlfahrt et al., 2008</i>)	Las Vegas (USA)	2005-2006	16	103	-106

Tabla 4. Temperatura anual promedio, T (°C); promedio anual de lluvia (mm); y promedio anual del intercambio de carbono a nivel de ecosistema (NEE, g C m⁻²) sobre suelos carbonatados.

Un desierto de matorral localizado en Baja California (Méjico) se comportó como un sumidero de carbono secuestrando aproximadamente 45 g C m⁻² año⁻¹ con una temperatura anual promedio de 24°C y una precipitación anual inferior a 200 mm (Hasting et al. 2005). No obstante, nuestros resultados no son consistentes con otros estudios realizados sobre suelo carbonatado (tabla 4). Dos ecosistemas semiáridos localizados en el sureste de Arizona emitieron un total de 130 g C m⁻² año⁻¹ aproximadamente (Emmerich 2003); un desierto localizado en el noreste de Las Cruces, Nuevo Méjico emitió un promedio anual de 145 g C m⁻² año⁻¹ desde 1996 hasta 2001. Por el contrario, el desierto de Mojave en Nevada secuestra al año un total de carbono muy similar al secuestrado por los bosques templados (Jasoni et al. 2005; Stone 2008; Wohlfahrt et al. 2008). Todos estos estudios señalan la importancia de la distribución de las lluvias y la contribución del componente geoquímico en los intercambios de carbono a escala de ecosistema. Estas diferencias en los intercambios de carbono de distintos ecosistemas carbonatados sugieren la necesidad de una mayor caracterización de los procesos geoquímicos para conocer los mecanismos que activan estos procesos así como su contribución en el balance anual de carbono.

5. CONCLUSIONES

La complejidad de los procesos que intervienen en los intercambios de CO₂ sobre ecosistemas de suelo carbonatado evidencia la necesidad de futuras investigaciones encaminadas a una división y una caracterización de estos procesos. Estos procesos son fundamentalmente: fotosíntesis, respiración, ventilación, disolución y precipitación de carbonatos. La fotosíntesis y la disolución de carbonatos son procesos relacionados con la captura de CO₂ por parte del ecosistema, mientras que la respiración, ventilación y precipitación de carbonatos liberan CO₂ a la atmósfera. En este sentido, a pesar de que los procesos biológicos (fotosíntesis y respiración) ya están muy estudiados, su interacción con los procesos geoquímicos requiere futuras investigaciones. Teniendo en cuenta que estos procesos actúan de forma conjunta durante casi todo el año, la técnica de *eddy covariance* y las medidas meteorológicas son incapaces de caracterizar por sí solas los intercambios de CO₂ sobre sustrato carbonatado. De este modo se requiere la aplicación de otras técnicas:

- Creación de modelos biogeoquímicos mediante el acoplamiento de los modelos biológicos y geoquímicos ya existentes, para dividir los intercambios de CO₂ en su componente biológica y geoquímica.
- Análisis isotópicos de carbono estable para discriminar entre los procesos que intervienen en los intercambios de CO₂
- Medidas de intercambio de gases a escala de hoja para estimar la razón fotosintética y la duración de los periodos de senescencia.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Andrew S. Kowalski, Lucas Alados arboledas, Alberto Cazorla, Francisco Domingo, Luis Villagarcía y Ana Were por su aportación en los análisis mostrados. Gracias a Cecilio Oyonarte y Sergio Sanchez-Moral por los resultados de análisis de suelo y roca madre. Y gracias a José Manuel Hidalgo Muñoz y Sara Pampín García por su análisis de componentes principales.

6. BIBLIOGRAFÍA

Asner, G. P., S. Archer, R. F. Hughes, R. J. Ansley y C. A. Wessman (2003). "Net changes in regional woody vegetation cover and carbon storage in Texas Dryland 1937-1999." *Global Change Biology* **9**: 316-335.

Baldocchi, D. D. (2003). "Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rate of ecosystem: past, present and future." *Global Change Biology* **9**: 479-492.

Baldocchi, D. D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, D. Running, P. M. Anthoni, C. Bernhofer, K. J. Davis, R. Evans, J. D. Fuentes, A. H. Goldstein, G. G. Katul, B. E. Law, Z. Lee, Y. Malhi, T. P. Meyers, W. Munger, W. Oechel, K. T. Paw U, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. B. Verma, T. Vesala, K. B. Wilson y S. C. Wofsy (2001). "FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities." *Bulletin of the American Meteorological Society* **82**: 2415–2434.

Bon-Lamberty, B., S. D. Peckham, D. E. Ahl y S. T. Gower (2007). "Fire as the dominant driver of central Canadian boreal forest carbon balance." *Nature* **450**: 89-93.

Cazorla, A., F. J. Olmo y L. Alados-Arboledas (2008). "Using a Sky Imager for aerosol characterization." *Atmospheric Environment* **42**(11): 2739-2745.

Domingo, F., L. Villagarcía, A. J. Brenner y J. Puigdefábregas (1999). "Evapotranspiration model for semi-arid shrub-lands tested against data from SE Spain." *Agricultural and Forest Meteorology* **95**: 67-84.

Dragoni, D., H. P. Schmid, C. S. B. Grimmond y H. W. Loescher (2007). "Uncertainty of annual net ecosystem productivity estimated using eddy covariance flux measurements." *Journal of geophysical research* **112**: 1-9.

Dunn, A. L., C. C. Barford, S. C. Wofsy, M. L. Goulden y B. C. Daube (2007). "A long-term record of carbon exchange in a boreal black spruce forest: means, responses to interannual variability, and decadal trends." *Global Change Biology* **13**(3): 577-590.

Eliasson, P. E., R. E. McMurtrie, D. A. Pepper, M. Strömgren, S. Linder y G. I. Agren (2005). "The response of heterotrophic CO₂ flux to soil warming." *Global Change Biology* **11**: 167-181.

Emmerich, E. W. (2003). "Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils." *Agricultural and Forest Meteorology* **116**: 91-102.

Falge, E., D. D. Baldocchi, R. Olson, P. M. Anthoni, M. Aubinet, C. Bernhofer, G. Burba, R. Ceulemans, R. Clement, A. J. Dolman, A. Granier, P. Gross, T. Grünwald, D. Hollinger, N. O. Jensen, G. G. Katul, P. Keronen, A. S. Kowalski, C. T. Lai, B. E. Law, T. P. Meyers, J. B. Moncrieff, E. J. Moors, J. W. Munger, K. Pilegaard, Ü. Rannik, C. Rebmann, A. E. Suyker, J. D. Tenhunen, K. Tu, S. B. Verma, T. Vesala, K. B. Wilson y

S. C. Wofsy (2001). "Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange." *Agricultural and Forest Meteorology* **107**: 43 - 69.

Falge, E., D. D. Baldocchi, J. Tenhunen, M. Aubinet, P. Bakwin, P. Berbigier, C. Bernhofer, G. Burba, R. Clement, J. D. Kenneth, J. Elbers, A. Goldstein, A. Grelle, A. Granier, J. Guðmundsson, D. Hollinger, A. S. Kowalski, G. Katul, B. E. Law, Y. Malhi, T. Meyers, R. K. Monson, J. W. Mungert, W. Oechel, K. T. Paw U, K. Pilegaard, Ü. Rannik, C. Rebmann, A. E. Suyker, R. Valentini, A. Wilson y S. C. Wofsy (2002). "Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements." *Agricultural and Forest Meteorology* **113**: 53-74.

Flanagan, L. B., J. R. Ehleringer y D. E. Pataki (2005). Stable Isotopes and Biosphere-Atmosphere Interactions: Processes and Biological Controls. San Diego (California), Elsevier Academic Press.

Ford, D. C. y P. W. Williams (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. U. Hyman. London: 601 pp.

Goddéris, Y., L. M. François, A. Probst, J. Schott, D. Moncoulon, D. Labat y D. Viville (2006). "Modelling weathering processes at the catchment scale: The WITCH numerical model." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* **70**: 1128-1147.

Gombert, P. (2002). " Role of karstic dissolution in global carbon cycle." *Global and Planetary Change* **33**: 177-184.

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

Hasting, S. J., W. C. Oechel y A. Muhlia-Melo (2005). "Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO₂ exchange of a desert shrub community (Sarcocaulis) in Baja California, Mexico." *Global Change Biology* **11**: 1-13.

Houghton, R. A. (2002). "Terrestrial carbon sink." *Biologist* **49**(4): 155-160.

Hunt, J. E., F. M. Kelliher, T. M. McSeveny, D. J. Ross y D. Whitehead (2004). "Long-term carbon exchange in a sparse, seasonally dry tussock grassland." *Global Change Biology* **10**: 1875-1800.

electronic

paper

Huxman, T. E., K. A. Snyder, D. Tissue, A. J. Leffler, K. Ogle, W. T. Pockman, D. R. Sandquist, D. L. Potts y S. Schwinning (2004). "Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems." *Oecologia* **141**: 254-268.

Janssens, I. A., A. Freibauer, P. Ciais, P. Smith, G.-J. Nabuurs, G. Folberth, B. Schlamadinger, R. W. A. Hutjes, R. Ceulemans, E.-D. Schulze, R. Valentini y A. J. Dolman (2003). "Europe's Terrestrial Biosphere Absorbs 7 to 12% of European Anthropogenic CO₂ Emissions." *Science* **300**: 1538-1542.

Jasoni, R. L., S. S. D. y J. A. Arnone (2005). "Net ecosystem CO₂ exchange in Mojave Desert shrublands during the eighth year of exposure to elevated CO₂." *Global Change Biology* **11**: 749-756.

Jones, H. G. (2000). Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge, United States of America, Syndicate of the University of Cambridge.

Keeling, C. D. (1960). "The concentration and isotopic abundance of carbon dioxide in the atmosphere." *Tellus* **12**: 200-203.

Kowalski, A. S., P. Serrano-Ortiz, I. A. Janssens, S. Sánchez-Moral, S. Cuezva, F. Domingo y L. Alados-Arboledas (2008). "Can flux tower research neglect 1 geochemical CO₂ exchange?" *Agricultural and Forest Meteorology* **148**(6-7): 1045-1054.

Krinner, G., N. Niovy, N. de Noblet-Ducoudre, J. Ogee, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch y I. A. Prentice (2005). "A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system." *Global Biogeochemical Cycles* **19**: 1015-1048.

Liu, Z. y J. Zhao (2000). "Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink." *Environmental Geology* **39**(9): 1053-1058.

Luyssaert, S., E.-D. Schulze, A. Knohl, D. Hessenmöler, B. E. Law, P. Ciais y J. Grace (2008). "Old-growth forests as global carbon sinks." *Nature* **455**(7210): 213-215.

Magnani, F., M. Mencuccini, M. Borghetti, P. Berbigier, F. Berninger, S. Delzon, A. Grelle, P. Hari, P. G. Jarvis, P. Kolari, A. S. Kowalski, H. Lankreijer, B. E. Law, A. Lindroth, D. Loustau, G. Manca, J. B. Moncrieff, M. Rayment, V. Tedeschi, R. Valentini y J. Grace (2007). "The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests." *Nature* **447**: 848-850.

McMillen, R. T. (1988). "An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain." *Boundary-Layer Meteorology* **43**: 231 - 245.

Mielnick, P., W. A. Dugas, K. Mitchell y K. Havstad (2005). "Long-term measurements of CO₂ flux and evapotranspiration in a Chihuahuan desert grassland." *Journal of Arid Environments* **60**: 423-436.

Moncrieff, J. B., J. M. Massheder, H. Bruin, J. Elbers, T. Friborg, H. b. B., P. Kabat, S. Scott, H. Soegaard y A. Verhoef (1997). "A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide." *Journal of Hydrology* **188-189**: 589-611.

Noy-Meir, I. (1973). "Desert Ecosystems: environment and producers." *Annual Review of Ecology and Systematics* **4**: 25-51.

Okin, G. S. (2001). Wind-Driven Desertification: Process Modeling, Remote Monitoring, and Forecasting (Charter 1). Pasadena, California, California Institute of Technology Pasadena, California.

Ooba, M., T. Hirano, J.-I. Mogami, R. Hirata y R. Fujinuma (2006). "Comparisons of gap-filling methods for carbon flux dataset: A combination of a genetic algorithm and an artificial neural network." *Ecological Modelling* **198**: 473-486.

Papale, D. y R. Valentini (2003). "A new assesment of European forest carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization." *Global Change Biology* **9**(525-535).

Pockman, W. T. y J. S. Sperry (1997). "Freezing-induced xylem cavitation and the northern limit of *Larrea tridentata*." *Oecologia* **109**: 19-27.

Reichstein, M., E. Falge, D. D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. G. Gilmanov, A. Granier, T. Grünwald, K. Havrankova, H. Ilvesniemi, A. knohl, T. Laurila, A. Lohila, D. Loustau, G. Matteucci, T. Meyers, F. Miglietta, J. M. Ourcival, J. Pumpane, S. Rambal, E. Rotenberg, M. Sanz, J. Tenhunen, G. Seufert, F. Vaccari, T. Vesala, D. Yakir y R. Valentini (2005). "On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm." *Global Change Biology* **11**: 1-16.

Resco, V., B. E. Ewers, W. Sun, T. E. Huxman, J. F. Weltzin y D. G. Williams (2008). "Drought-induced hydraulic limitations constrain leaf gas exchange recovery after precipitation pulses in the C3 woody legume, *Prosopis velutina*." *New Phytologist* **IN PRESS**.

Schlesinger, W., J. Reynolds, G. Cunningham, L. F. Huenneke, W. M. Jarrel, R. A. Virginia y W. G. Whitford (1990). "Biological feedbacks in global desertification. Science." *Science* **247**(4946): 1043-1048.

Schwinning, S. y O. E. Sala (2004). "Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems." *Oecologia* **141**: 211-220.

Serrano-Ortiz, P. (2008). Tesis Doctoral. Intercambios de CO2 entre atmósfera y ecosistemas kársticos: aplicabilidad de las técnicas comúnmente empleadas. Granada, Universidad de Granada.

Serrano-Ortiz, P., A. S. Kowalski, F. Domingo, A. Rey, E. Pegoraro, L. Villagarcía y L. Alados-Arboledas (2007). "Variations in daytime net carbon and water exchange in a montane shrubland ecosystem in southeast Spain." *Photosynthetica* **45**(1): 30-35.

Serrano-Ortiz, P., A. S. Kowalski, F. Domingo, B. Ruiz y L. Alados-Arboledas (2008). "Consequences of uncertainties in CO2 density for estimating net ecosystem CO2 exchange by open-path eddy covariance." *Boundary-Layer Meteorology* **126**: 209-218.

Smith, S. D., T. E. Huxman, S. F. Zitzer, T. N. Charlet, D. C. Housman, J. S. Coleman, L. K. Fenstermaker, J. R. Seemann y R. S. Nowak (2000). "Elevated CO2 increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem." *Nature* **408**: 79-82.

Stone, R. (2008). "Have Desert Researchers Discovered a Hidden Loop in the Carbon Cycle?" *Science* **320**: 1409-1410.

Tans, P. P., I. Y. Fung y T. Takahashi (1990). "Observational Constraints on the Global Atmospheric CO₂ Budget." *Science* **247**: 1431-1438.

Valentini, R., G. Matteucci, A. J. Dolman, E.-D. Schulze, C. Rebmann, E. J. Moors, A. Granier, P. Gross, N. O. Jensen, K. Pilegaard, A. Lindroth, A. Grelle, C. Bernhofer, T. Grünwald, M. Aubinet, R. Ceulemans, A. S. Kowalski, T. Vesala, Ü. Rannik, P. Berbigier, D. Loustau, J. Guðndmonson, H. Thorgeirsson, A. Ibrom, K. Morgenstern, R. Clement, J. B. Moncrieff, L. Montagnani, S. Minerbi y P. G. Jarvis (2000). "Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests." *Nature* **404**: 861 - 865.

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

Wohlfahrt, G., L. F. Fenstermaker y J. A. Arnone (2008). "Large annual net ecosystem CO₂ uptake of a Mojave Desert ecosystem." *Global Change Biology* **14**: 1475-1487.

Yakir, D. y L. S. L. Sternberg (2000). "The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange." *Oecologia* **123**: 297-311.