



## **Evaluación de las técnicas seleccionadas para la realización del segundo inventario de sumideros de CO<sub>2</sub> en Andalucía**

Elaborado por la Dra. Penélope Serrano Ortiz bajo la supervisión del Dr. Andrew S. Kowalski del grupo de Física Aplicada de la Universidad de Granada

# Índice

1. Antecedentes .....	1
2. Primer inventario de sumideros de CO <sub>2</sub> en Andalucía .....	3
3. Técnicas seleccionadas y evaluación .....	6
3.1 Modelos basados en la dinámica de la vegetación y variables meteorológicas.....	7
3.2 Modelos basados en imágenes de satélite.....	13
3.3 Instrumentación para la medida de flujos turbulentos de CO <sub>2</sub> y vapor de agua a escala de ecosistema .....	18
3.4 Medidas puntuales de flujo de CO <sub>2</sub> en suelo y hojas .....	27
3.5 Estimación del carbono y el CO <sub>2</sub> equivalente contenido en la biomasa y suelos forestales .....	30
 Bibliografía .....	 34

# 1. ANTECEDENTES

La quema de combustible fósil iniciada en la revolución industrial, así como los cambios de uso de suelo han dado lugar a un aumento en la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico. Este aumento conlleva un calentamiento global terrestre asociado al consiguiente aumento del efecto invernadero. Ante esta problemática, la convención marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático celebrada en Río de Janeiro en 1992 reconoció que el cambio climático constituía una de las principales amenazas para el medio ambiente. En 1997 surge el protocolo de Kyoto como herramienta para favorecer la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.

En respuesta al Consejo Europeo de junio de 1998, en el que se acordó el reparto de carga en lo referente a las emisiones de los estados miembros, la Junta de Andalucía ha expresado su voluntad de contribuir al cumplimiento de los compromisos del Estado español en materia de Cambio Climático adoptando una estrategia andaluza ante el Cambio Climático y desarrollando un Plan Andaluz de Acción por el Clima: 2007-2010: Programa de mitigación. Bajo este contexto, la Dirección General de Gestión del Medio Natural de la Consejería de Medio Ambiente presentó en 2004 el 1<sup>er</sup> inventario de sumideros de CO<sub>2</sub> en Andalucía.

Así mismo, la Dirección General de Participación e Información Ambiental, por sus competencias ligadas al desarrollo de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) pretende lanzar una línea de trabajo orientada a la cuantificación del carbono asimilado o emitido por la región andaluza. El lanzamiento de esta línea de trabajo exige un estudio preliminar de evaluación de las distintas técnicas y metodologías aplicables.

Algunas de las técnicas que se describen a continuación han sido o están siendo empleadas en otras regiones del mundo para la estimación del balance regional de carbono. Estas técnicas se basan en la medida, modelización y estimación de los intercambios de CO<sub>2</sub> entre atmósfera y superficie (apartados 3.1 y 3.3). Entre los proyectos en marcha relacionados con una estimación de los intercambios de carbono a nivel regional destacamos el proyecto ORCA destinado a la estimación del balance regional de Carbono en Oregón-California (parte del proyecto CARB IUS), los estudios sobre balance regional en Inglaterra (Matross et al., 2006) o el proyecto regional llevado a cabo dentro del proyecto Europeo CARBOEUROPE-IP centrado en el balance de carbono de una región situada al suroeste de Francia (300kmx300km) .

## 2. PRIMER INVENTARIO DE SUMIDEROS DE CO<sub>2</sub> EN ANDALUCÍA

En el año 2004 la Dirección General de Gestión del Medio Natural de la Consejería de Medio Ambiente presentó el 1<sup>er</sup> inventario de sumideros de CO<sub>2</sub> en Andalucía. Este inventario se ha elaborado según los establecido en la Guía de Buenas Prácticas para el sector, Land Use and Land Use Change and Forestry (GPG LULUCF) que establece técnicas para estimar, medir y realizar seguimientos sobre cambios en el stock de carbono.

### RESUMEN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA ELABORACIÓN DEL INVENTARIO

Según la Guía de Buenas Prácticas (GPG LULUCF) el inventario de CO<sub>2</sub> para una región debe realizarse de forma muy general siguiendo las pautas que se describen a continuación. Primero, tras seguir las pautas contenidas en el Capítulo 3 de la GPG LULUCF, se establecen las **distintas áreas** de tierra que se engloban en **seis categorías generales** (capítulo 2). Posteriormente, teniendo muy en cuenta que un uso de suelo de una categoría concreta puede cambiar de categoría, se asesora en el capítulo 3 sobre las estimaciones de emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> y otros gases del efecto invernadero para cada categoría y cada **suelo que cambia de categoría**. A continuación, se establece para cada categoría las **variaciones de reserva de carbono** que son consecuencia de variaciones de carbono **en la biomasa viva, en la materia orgánica muerta y en el suelo**. Para cada una de estas variaciones y para cada categoría se elaboran **ecuaciones para el cálculo** de la variación en el contenido de carbono. La incertidumbre en la obtención de estas variaciones dependerá del nivel al que el país se acoja, en función de si el país presenta métodos avanzados o dispone de datos suficiente. La incertidumbre de las estimaciones disminuye al aumentar el nivel.

## EVALUACIÓN GENERAL DEL INVENTARIO

La GPG LULUCF presenta la **ventaja** de ser una guía que usa ecuaciones sencillas para el cálculo en las variaciones de reserva de carbono en las distintas categorías de usos de suelo. Así mismo, estas ecuaciones se adaptan fácilmente a los distintos países en función de la disponibilidad de información. Se distinguen tres niveles metodológicos de aproximación:

- Nivel 1. El país utiliza el método básico y se aplican factores de emisión proporcionados por defecto por el IPCC

- Nivel 2. Usa el método básico pero aplicando datos específicos del país o región de estudio para las actividades y usos del terreno más importantes. Pueden usarse metodologías específicas si existen

- Nivel 3. Se decanta por modelos e inventarios adaptados a las características particulares para cada región o país, con alta resolución de los datos, desagregados a menor escala y actualizados periódicamente.

Las **desventajas** de la metodología redactada en la GPG LULUCF radica fundamentalmente en su intención de poder aplicarse de forma general en las distintas regiones o países. Por un lado, los **resultados** obtenidos por cada región son **difícilmente comparables**. Una región que haya aplicado la metodología contenida en el nivel 3 difícilmente podrá comparar sus resultados con una región que haya aplicado fundamentalmente el nivel 1 (alta incertidumbre en los resultados). Asimismo, la agrupación del terreno en seis categorías de uso cuestiona mucho la fiabilidad de las variaciones de carbono obtenidas en terrenos englobados en alguna de estas categorías pero de especial singularidad. Este es el caso de los **matorrales mediterráneos andaluces o el olivar** que se engloban en las categorías de terrenos forestales y agrícolas respectivamente.

Más concretamente, si nos centramos en la evaluación del **primer inventario de sumideros de CO<sub>2</sub> en Andalucía** destacamos una **importante**

**incertidumbre** que cuestiona la fiabilidad de los resultados obtenidos. Esta incertidumbre se fundamenta en dos factores relacionados con la estimación de carbono en suelos (no debemos olvidar que a escala mundial **existe tres veces más carbono en el suelo que en la vegetación** (Conen et al., 2004) tratándose por tanto de un componente esencial en el ciclo del carbono) :

1º Al no existir fuentes de información disponibles, se ha extrapolado una **serie temporal de 4 años** (de 1991 a 1995 y de 1996 a 1999) **no respetando el tiempo de respuesta** del suelo ante variaciones de uso de suelo, clima o gestión. Las directrices del IPCC establecen un supuesto práctico según el cual los cambios de uso de la tierra producen un efecto lineal en la materia orgánica del suelo durante 20 años antes de alcanzar un nuevo equilibrio.

2º Para la aplicación de las ecuaciones propuestas se han usado valores de contenido de **carbono de referencia propuestos por la GPG LULUCF (nivel 1)** y valores de parámetros propuestos también por la GPG LULUCF o tomados de un estudio realizado en el año 2003 en Chiapas (Méjico) (Mendoza-Vega et al., 2003). Esta premisa da lugar a **cálculos muy inciertos** tal y como se expone en la GPG LULUCF.

De este modo, a pesar de que el nivel de aproximación usado por este primer inventario ha sido en numerosas ocasiones un nivel de 2, el hecho de **emplear un nivel de aproximación de 1** en la gran mayoría de los suelos andaluces y **extrapolar una serie temporal de 4 años a 20 años, reduce considerablemente la credibilidad de los resultados obtenidos.**

### 3. TÉCNICAS SELECCIONADAS Y EVALUACIÓN

Para una estimación ideal del balance de carbono a escala de Andalucía deberíamos considerar a Andalucía como un volumen cerrado de altura la capa límite planetaria. Bajo esta premisa deberíamos ser capaces de cuantificar el contenido de CO<sub>2</sub> de la masa de aire a la entrada y a la salida de nuestro volumen control en función de la dirección de viento. La diferencia entre ambas concentraciones nos dará una estimación de la cantidad de carbono asimilado o emitido por nuestra región. La forma más eficaz de realizar esta medida es mediante **torres altas** (400 m aprox.) capaces de cuantificar la concentración de CO<sub>2</sub> en perfiles (Washenfelder et al., 2006; Marquis and Tans 2008). **Ventajas:** nos proporciona un valor periódico del intercambio de CO<sub>2</sub> entre Andalucía y la atmósfera. **Inconvenientes:** elevado coste debido a la necesidad de varias torres altas, además, es una técnica muy reciente que necesita de unas condiciones climatológicas y orográficas muy específicas, no aporta información a una menor escala (ejm. cuantificación de la cantidad de carbono asimilado o emitido en función de los tipos de suelo de carbono) imposibilitando una posible gestión de las emisiones, no existe equipamiento para la aplicación de esta técnica a nivel de Andalucía ni personal investigador cualificado para llevarlo a cabo en el periodo establecido (pocos años). Los inconvenientes mencionados anteriormente nos han llevado a descartar esta metodología al menos por ahora.

Si lo que deseamos es conocer los intercambios de carbono a nivel de usos de suelo y una posterior extrapolación regional, debemos cuantificar las fuentes antropogénicas emisoras de CO<sub>2</sub> (quema de combustible fósil, cambios de uso de suelo, incendios, ...) así como conocer el comportamiento de las superficies naturales, con intercambios debidos a la fotosíntesis (asimilación de carbono por el ecosistema), la respiración (emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera), y las posibles reacciones geoquímicas que pueden intervenir.



### 3.1 MODELOS BASADOS EN LA DINÁMICA DE LA VEGETACIÓN Y VARIABLES METEOROLÓGICAS

Se trata de modelos basados en la dinámica global de la vegetación que simula los principales procesos de la biosfera que afectan al ciclo global del carbono. Estos procesos son: fotosíntesis, respiración autótrofa y heterótrofa de plantas y suelo, incendios, etc. Asimismo, simula también los intercambios de energía (calor latente y sensible) en superficie. Dentro de este bloque existen un gran número de modelos, entre ellos destacamos los siguientes por ser los más usados dentro de la comunidad científica y en proyectos europeos para la estimación del balance regional de carbono:

- Modelo ORCHIDEE (Krinner et al., 2005)
- Modelo LPJ (Sitch et al., 2003)
- Modelo BIOME-BGC (Thornton et al., 2003)

Una comparación de estos tres modelos puede encontrarse en (Jung et al., 2007).

#### DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Como ya se ha comentado anteriormente estos modelos simulan los procesos de la biosfera que afectan al ciclo global del carbono para estimar el intercambio de carbono a nivel del ecosistema para cada vegetación (PFTs). Al tratarse de modelos basados en la dinámica de la vegetación incluye además procesos de competencia, como puede ser competencia por la luz y establecimiento de individuos jóvenes. Estos modelos tienen la peculiaridad de pronosticar el ciclo fenológico de la vegetación sin necesidad de usar información de imágenes de satélite.

### Variables de entrada:

**Variables que no dependen del tiempo.** Los programas recogen hasta 25 tipos de vegetación. Cada tipo contiene tabulados distintos valores de algunos parámetros de entrada que se consideran independientes del tiempo. Estos parámetros son:

- Uso del suelo
- Fracción de cada uso de suelo
- Textura del suelo
- Profundidad del suelo
- Mapa de elevación del terreno
- Albedo
- Capacidad de retención de agua del suelo

**Variables dependientes del tiempo.** Para la aplicación del modelo se necesita conocer la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico (valor anual). Además es necesario tener información diaria o mensual de las siguientes variables meteorológicas:

- Temperatura del aire
- Precipitación
- Radiación global

Esta información puede extraerse de las estaciones meteorológicas distribuidas por Andalucía.

### Variables de salida:

El modelo realiza una estimación diaria, mensual o anual de las siguientes variables en unidades de kg C m<sup>2</sup>:

- Producción fotosintética (GPP, *Gross Photosynthetic Production*)
- Producción primaria neta (NPP, *Net Primary Productivity*)
- Producción neta del ecosistema (NEP, *Net Ecosystem Productivity*)

Además proporciona información de las siguientes variables:

- Respiración de suelo (respiración heterotrófica y autotrófica) en unidades de  $\text{kg C m}^{-2}$
- Promedio mensual o anual del LAI
- Valor máximo del reservorio de Carbono anual en vegetación, materia orgánica sin descomponer y suelo en unidades de  $\text{kg de C m}^{-2}$
- Transpiración anual y mensual en unidades de  $\text{kg de H}_2\text{O m}^{-2}$
- Evaporación anual y mensual en unidades de  $\text{kg de H}_2\text{O m}^{-2}$
- Contenido anual y mensual de agua en el suelo en unidades de  $\text{mm de H}_2\text{O}$

## EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA Y PRESUPUESTO

### Obtención de las variables de entrada y presupuesto:

Las medidas de las **variables meteorológicas** (variables dependientes del tiempo) se pueden extraer de las distintas torres meteorológicas instaladas en Andalucía. En su defecto podría utilizarse información de la ECMEF (en el caso de España, Agencia Estatal de meteorología, AEMET). Estas variables de entrada **no suponen coste adicional** por parte de la CMA.

Con respecto a las **variables que no dependen del tiempo**, cada uno de los modelos establece distintos tipos de vegetación que tienen tabulados los valores

de estos parámetros. Según esta información, la aplicación del modelo no supone **ningún gasto adicional** para la CMA.

En la actualidad existe un gran número de modelizadores cuya labor investigadora está destinada a la optimización y validación de estos modelos para distintos tipos de vegetación. Esta situación denota una complejidad en la aplicación de los modelos para la obtención de unos resultados fiables y comparables. De este modo, dada la complejidad de estos modelos, es necesario un **científico especializado** y con formación previa para la aplicación de estos modelos. Esta formación previa podría adquirirse con una **estancia breve** (tres meses) en el país de origen del modelo que podría suponer **un coste de unos 9000€**.

Además, para **validar y optimizar las variables de salida** obtenidas con los modelos es necesaria la toma de medidas de flujos de CO<sub>2</sub> "in situ" a nivel de ecosistema. La instrumentación necesaria para la realización de estas medidas supone un coste de **42.500 €** por cada ecosistema donde se desee medir (ver apartado 3.3), sin contar con el coste del **técnico especializado** para el mantenimiento de la instrumentación y realización de los cálculos necesarios. No obstante resaltamos que **en Andalucía ya se están llevando a cabo medidas de este tipo** en Sierra Nevada, Cabo de Gata, Sierra de Gádor y Doñana (apartado 3.3).

Así mismo, es necesaria la adquisición de **ordenadores de gran capacidad** que posibiliten la aplicación del modelo. Este requisito de material podría suponer un coste de aproximadamente **10000€**.

A continuación se exponen las ventajas e inconvenientes de la aplicación de esta técnica en Andalucía. Para ello se han seguido los criterios establecidos en el contrato que comprenden criterios científico-técnicos y criterios relacionados con:

- Costes económicos tanto del proceso de cálculo como de la adquisición de las variables de entrada

- Costes temporales de evolución y periodicidad del cálculo (escala temporal)
- Escala de trabajo
- Aprovechamiento de la información ya existente en la CMA como variables de entrada del sistema
- Obtención de resultados compatibles con otra información de la CMA (para su integración en la REDIAM)
- Obtención de resultados estándares comparables con estadísticas mundiales, nacionales o regionales.

### Ventajas:

**Aprovecha información ya existente** en la CMA como son las variables de entrada del modelo y permite **optimizar** algunos parámetros de entrada. Cabe la posibilidad de medir determinados parámetros que el modelo considera constantes para cada tipo de vegetación.

Los programas están escritos en **lenguaje FORTRAN** y son susceptibles de ser modificados.

La **escala temporal** de obtención de información puede ser diaria, mensual o anual. La **escala espacial** dependerá del tipo de vegetación con el que estemos trabajando.

Los resultados obtenidos (GPP, NPP, NEP, valor de los reservorios de carbono, LAI, Transpiración, Evaporación y contenido de agua en el suelo) pueden **integrarse** dentro de la Red de Información Ambiental de Andalucía (**REDIAM**) como un criterio más de cara a la gestión de los usos del suelo. Podría incluirse como un producto similar a los mapas de usos de suelo y cobertura vegetal o como un índice para el seguimiento y gestión de los distintos ecosistemas.

Además, estos modelos ya están **estandarizados a escala internacional** y regional y los resultados obtenidos podrían **compararse** con resultados obtenidos en otros ecosistemas con vegetación similar.

### **Inconvenientes:**

El modelo considera que el flujo de CO<sub>2</sub> en ecosistemas se debe **únicamente** a procesos de **fotosíntesis y respiración** y no considera los flujos de CO<sub>2</sub> de tipo abiótico que se producen en los ecosistemas carbonatados (Kowalski et al., 2008).

Puede darse el caso de que algún tipo de **vegetación de Andalucía** no se corresponda a los tipos de vegetación contenidos en los modelos.

El coste económico del proceso de cálculo es elevado (se requiere un científico cualificado y formado, así como equipamiento específico (ordenadores de alta capacidad de computación)). Asimismo, los resultados previos obtenidos con el modelo serán de escasa validez científica siendo **imprescindible la optimización** de las variables de entrada y **la validación** de los resultados obtenidos (ver capítulo 3.3)

### **Calidad de los resultados:**

La calidad de los datos de salida obtenidos **dependerá** de cómo de bien el tipo de vegetación seleccionada represente la realidad de cada vegetación de Andalucía. A medida que se vayan optimizando las variables de entrada el modelo será capaz de aportarnos información más fiable acerca de los intercambios de carbono.

## 3.2 MODELOS BASADOS EN IMÁGENES DE SATÉLITE

Este modelo podría incluirse dentro del apartado anterior 2.1. Hemos decidido darle una importancia particular dada su fácil aplicación y disponibilidad de las variables de entrada por la CMA.

Se trata de un modelo cuyas variables de entrada son única y exclusivamente imágenes de satélite y medidas de temperatura y flujo de fotones, el modelo que se detalla a continuación recibe el nombre de *Vegetation, Photosynthesis and Respiration Model* (VPRM) y fue publicado por (Mahadevan et al., 2008). Tras la aplicación de este modelo obtendremos una estimación horaria del intercambio de CO<sub>2</sub> para una superficie de 250m x 250m.

### DESCRIPCIÓN DEL MODELO

#### Variables de entrada:

- Dos variables que se derivan de los datos de reflectancia de MODIS (MOD09): Enhanced Vegetation Index (EVI) y Land Surface Water Index (LSWI).

#### **Cálculo de EVI:**

$$EVI = G \times \frac{(\rho_{nir} - \rho_{red})}{\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L}$$

Donde  $G=2.5$ ,  $C_1=6$ ,  $C_2=7.5$ ,  $L=1$ ,  $\rho_{nir}$  es la reflectancia de la superficie del infrarrojo próximo (producto de modis MOD09 banda 2),  $\rho_{red}$  es la reflectancia de la superficie en el rojo (producto de modis MOD09 banda 1 (centrada en 648 nm))

### Cálculo de LSWI:

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}}$$

Donde  $\rho_{swir}$  es la reflectancia de la superficie a longitudes de onda comprendidas entre 1628-1652 nm (producto MOD09 banda 6 (centrada en 1640 nm))

- Medidas del flujo de **fotones** fotosintéticamente activos a alta resolución
- Medidas de **temperatura** a alta resolución.

### Variable de salida:

Aplicando el modelo obtenemos una estimación horaria del intercambio de carbono a nivel de ecosistema (NEE) para una superficie de 250mx250m.

## EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA Y PRESUPUESTO

### Obtención de las variables de entrada y presupuesto:

La Consejería de Medio Ambiente ya trabaja con productos de MODIS por lo que la adquisición de los productos MOD09 bandas 1, 2 y 6 para el cálculo de las **variables de entrada** *Enhanced Vegetation Index (EVI)* y *Land Surface Water Index (LSWI)* **no** va a suponer un **coste adicional** para la Consejería.

Con respecto a la obtención de medidas horarias de flujo de fotones, destacamos que la red de torres meteorológicas instaladas en Andalucía no dispone de medidas de flujo de fotones de alta resolución. No obstante esta información puede estimarse con medidas de radiación global que sí son tomadas en la mayoría de las torres meteorológicas andaluzas. Para ello sólo hay que multiplicar por un factor constante las medidas de radiación global (Ceulemans et al., 2003).



Las medidas de temperatura se extraerán de las distintas torres meteorológicas instaladas en Andalucía.

El coste económico de la obtención de las variables de entrada será únicamente el **coste** que suponga la obtención de los **productos de MODIS** mencionados anteriormente (siendo probable que estos productos ya estén solicitados por la Consejería). Las medidas de temperatura y radiación global no suponen ningún coste adicional ya que se trata de información extraída de las torres meteorológicas andaluzas.

Como consecuencia de lo mencionado anteriormente, el **coste** para la aplicación de esta técnica sería el coste que supone la contratación de un **técnico especializado** para la descarga de las variables de entrada y la aplicación del modelo.

A continuación se exponen las ventajas e inconvenientes de la aplicación de esta técnica en Andalucía. Para ello se han seguido los criterios establecidos en el contrato que comprenden criterios científico-técnicos y criterios relacionados con:

- Costes económicos tanto del proceso de cálculo como de la adquisición de las variables de entrada
- Costes temporales de evolución y periodicidad del cálculo (escala temporal)
- Escala de trabajo
- Aprovechamiento de la información ya existente en la CMA como variables de entrada del sistema
- Obtención de resultados compatibles con otra información de la CMA (para su integración en la REDIAM)
- Obtención de resultados estándares comparables con estadísticas mundiales, nacionales o regionales.

### Ventajas:

Es una metodología basada en la utilización de un modelo matemático muy simple con pocos parámetros de entrada y por tanto se trata de un modelo de **fácil aplicación**.

**Aprovecha información** ya existente en la CMA como son las variables de entrada del modelo.

La **escala temporal** de obtención de información es de una hora y su **escala de trabajo** es de parcelas de 250m x 250m.

Este modelo tiene capacidad de **optimizar** los parámetros del modelo. Cabe la posibilidad de medir determinados parámetros que el modelo considera constantes.

Los resultados obtenidos (estimación horaria del intercambio de carbono en parcelas de 250m x 250m) pueden **integrarse** dentro de la Red de Información Ambiental de Andalucía (**REDIAM**) como una información más de cara a la gestión de los usos del suelo. Podría incluirse como un producto más similar a los mapas de usos de suelo y cobertura vegetal o como un índice para el seguimiento y gestión de los distintos ecosistemas.

### Inconvenientes:

El modelo considera que el flujo de CO<sub>2</sub> en ecosistemas se debe **únicamente** a procesos de **fotosíntesis y respiración** y no considera los flujos de CO<sub>2</sub> de tipo abiótico que se producen en los ecosistemas carbonatados (Kowalski et al., 2008).

El modelo considera que la respiración depende únicamente de la temperatura. En ecosistemas semiáridos, como es el caso de la mayoría de los ecosistemas andaluces, la respiración se ve limitada sobre todo por la cantidad de agua contenida en el suelo (Reichstein et al., 2002; Rey et al., 2005), y esta limitación no se sabe modelizar en la actualidad. Cuanto más elevada es la temperatura, menos es la respiración en terrenos semiáridos debido a la falta de agua, mientras este modelo predice una respiración máxima. Además, no tiene

en cuenta que la materia orgánica presente en el suelo y disponible para su descomposición juega también un importante papel. Los **parámetros constantes** que se introducen en el modelo para cada tipo de ecosistema están estimados en ecosistemas del Norte de América y su **validez en Andalucía es dudosa y extremadamente dudosa en el caso de la respiración.**

El tamaño de píxel de las imágenes de satélite considera al **terreno homogéneo** en una superficie de 6 hm<sup>2</sup>

No tiene en cuenta la **variabilidad** de tipos de **suelo**, estructura y textura en la estimación de la respiración.

Al tratarse de un modelo de reciente publicación (2008) aún no se está usando por la comunidad científica internacional de forma general. Por este motivo, los **resultados** obtenidos **no** son estándares ni **comparables** a escala regional o nacional.

#### Calidad de los resultados:

Al tratarse de un simple modelo matemático con pocas variables de entrada, la calidad del resultado obtenido **es de escasa fiabilidad**. No obstante, su **fácil aplicación** y la obtención de **resultados** casi **inmediatos** la convierten en una técnica **factible** de aplicar en Andalucía.

### 3.3 INSTRUMENTACIÓN PARA LA MEDIDA DE FLUJOS TURBULENTOS DE CO<sub>2</sub> Y VAPOR DE AGUA A ESCALA DE ECOSISTEMA

Otra posible técnica para cuantificar el carbono asimilado o emitido por los ecosistemas de la región andaluza es la medida directa del flujo de CO<sub>2</sub> a nivel de ecosistema. La técnica más empleada para realizar este tipo de medidas es la **técnica *eddy covariance* (EC)** por ser la única capaz de medir directamente los flujos de CO<sub>2</sub> y vapor de agua entre un ecosistema y la atmósfera sin perturbar el medio.

#### DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA EC

Esta técnica se basa en la toma de medidas directas de flujo turbulento próximo a la superficie. Para ello requiere instrumentación capaz de trabajar con una respuesta rápida y una alta frecuencia de muestreo (i.e. 10 Hz). Esta técnica nos proporciona información acerca de los **flujos en escalas de una hora o incluso menos**. Con esta técnica, a pesar de las dificultades a la hora de la toma y almacenamiento de medidas en continuo, se puede realizar una **integración a escala anual** o a más largo plazo del intercambio de CO<sub>2</sub> a nivel de ecosistema (Wofsy et al., 1993). Con carácter general, gracias a esta instrumentación (torres EC) obtenemos información (normalmente cada 30 min.) de las siguientes variables:

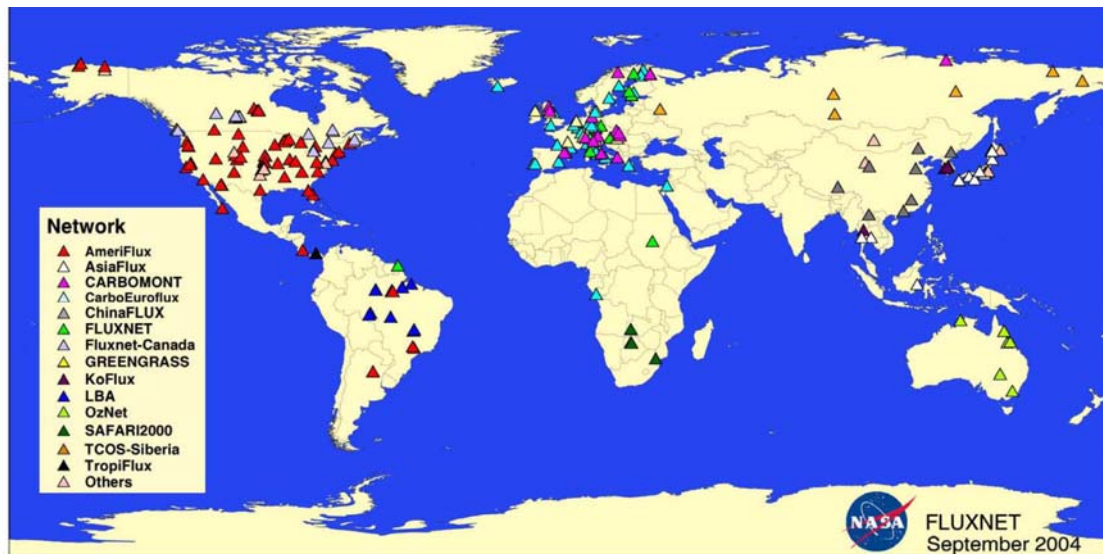
- Flujos de CO<sub>2</sub> y vapor de agua
- Flujos de calor sensible y calor latente
- Radiación neta
- Flujo de fotones fotosintéticamente activos
- Flujo de calor al suelo
- Temperatura y humedad del aire

- Temperatura y humedad del suelo
- Velocidad y dirección del viento...



Ejemplo de una torre de eddy covariance instalada en el campo. Más concretamente se trata de la torre EC instalada en el Llano de lo Juanes (Sierra de Gádor, Almería).

En este contexto, existe una **red internacional** llamada **FLUXNET** a la que están adheridos numerosos investigadores de todo el mundo que trabajan en el análisis de los flujos de CO<sub>2</sub> (Baldocchi 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. Esta red internacional está compuesta a su vez de distintas redes a nivel continental como es el caso de Asiaflux, Ameriflux o **Carboeurope**. Así mismo, La Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (Fundación CEAM) gracias al proyecto de investigación, “**Red de observación sistemática de los flujos de carbono y energía en ecosistemas terrestres en España**”, CGL2006-14195-C02, liderado por la Dra. **M<sup>a</sup> José Sanz**, está poniendo en marcha la elaboración de una **red** de estas características a nivel **estatal**.

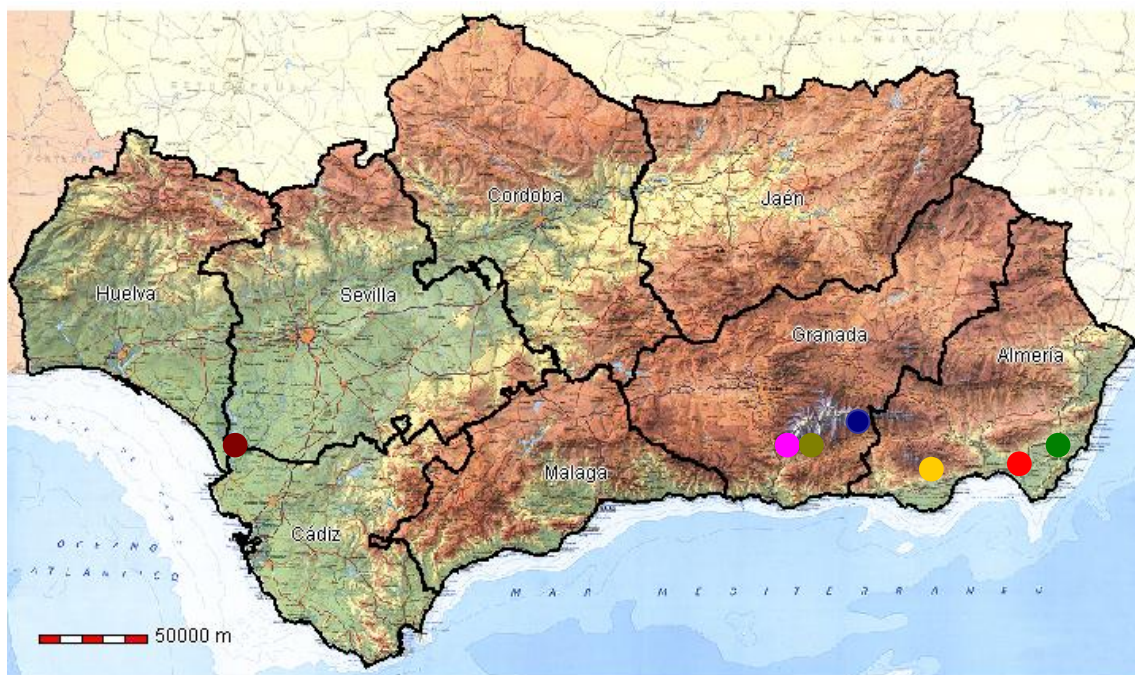


3

ORNL DAAC

Figura 1. Ubicación de las torres de medida de flujos turbulentos pertenecientes a la red internacional FLUXNET

A nivel andaluz se han instalado un total de 7 torres de medida de flujos turbulentos distribuidas por distintos ecosistemas de Andalucía. A nivel de Andalucía **no existe en la actualidad ninguna red de tipo regional** que gestione o controle la información obtenida gracias a estas torres. A continuación se localizan las distintas torres disponibles:



● Torre de Amoladeras (50 m de altitud). Matorral degradado. Contacto: Francisco Domingo Poveda (CSIC, Almería). Datos disponibles desde 2007.

● Torre de Balsablanca (50 m de altitud). Matorral. Contacto: Francisco Domingo Poveda (CSIC, Almería). Datos disponibles desde 2006.

● Torre de El llano de los Juanes (1600 m de altitud). Matorral de alta montaña de porte medio. Contacto: Andrew S. Kowalski (Universidad de Granada). Datos disponibles desde 2004.

● Torre de Laguna Seca (2300 m de altitud). Matorral de alta montaña de porte bajo. Contacto: Andrew S. Kowalski (Universidad de Granada)-Parque Natural de Sierra Nevada. Datos disponibles desde 2006.

● Torre de Lanjarón (2300 m de altitud). Ecosistema de pinos de alta montaña tras sufrir un incendio. Contacto: A. S. Kowalski (Universidad de Granada)-Parque Natural de Sierra Nevada. Datos disponibles desde 2008.

● Torre móvil (Lanjarón) :Ecosistemas con distintos tratamientos postincendio. Propiedad : A. S. Kowalski (Universidad de Granada).

● Torre en Doñana : Ecosistema de Sabinar (*Juniperus oophora*). Contacto : Ricardo Díaz Delgado (Estación Biológica Doñana, CSIC). Estado actual : puesta a punto de la instrumentación.

Además de las torres mostradas en el mapa, **existe en Córdoba una torre EC** cuya persona de contacto es Francisco Villalobos de la Universidad de Córdoba. Esta torre está destinada a estudios de evapotranspiración y balance hídrico a nivel de ecosistema (Villalobos 1997). No obstante, bajo el consentimiento de la persona responsable, esta torre podría equiparse con la instrumentación necesaria para la medida de variaciones en la concentración de

CO<sub>2</sub> (LI-7500, presupuesto=18000€) siendo así posible obtener valores de flujo de CO<sub>2</sub> a nivel de ecosistema.

## EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA Y PRESUPUESTO

Las torres de EC Andaluzas instaladas gracias a proyectos concedidos por la Junta de Andalucía, los Parques Nacionales y el Gobierno Español, ya están comenzando a obtener valores de flujo de CO<sub>2</sub> y vapor de agua fiables a escalas que van desde la media hora hasta el año.

Si se estima conveniente se podrían instalar nuevas torres en Andalucía, esto podría llevarse a cabo tras realizar un exhaustivo estudio de los usos de suelo más representativos de nuestra región en los que ya se está midiendo con torres EC y los usos de suelo que quedarían por medir. El coste de la instalación de una nueva torre EC se puede desglosar en el coste del técnico encargado del mantenimiento de la torre y manejo de los datos (40000€) y el coste de la instrumentación e instalación (32500€ y 10000€ respectivamente). El presupuesto detallado se adjunta a continuación:

### Soporte y adquisición de datos

Sistema de adquisición de datos.....	5000 €
(Data logger CR3000+ complementos)	
Torreta .....	2500 €
	7500 €

### Instrumentación para medida de flujos turbulentos

Anemómetro sónico (RMYoung 8100) .....	3000 €
Analizador de gases en el infrarrojo (LI-700 IRGA CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O) .....	18000 €
	21000 €



### **Instrumentación para medida de otras variables ambientales**

Sensor de quantum (Flujo de fotones, LI-190SA).....	1500 €
Termohigrómetro (temperatura y humedad del aire, HMP-35C).....	700 €
Placas de flujo de calor al suelo(HFP-01SC) .....	800 €
Pluviómetro .....	600 €
Sensor de radiación neta (NR lite).....	1300 €
Sensor de temperatura de suelo (temperatura promedio, TCAV).....	400 €
Sensor de humedad de suelo (TDR, CS616) .....	400 €
	<hr/>
	<b>2700 €</b>

### **Alimentación del sistema**

Paneles solares .....	800 €
Baterías .....	300 €
Reguladores.....	150 €
	<hr/>
	<b>1250 €</b>

### **Personal**

Coste de instalación de la torre y la instrumentación .....	10000 €
Técnico para mantenimiento de la torre y procesado de los datos.....	40000 €
<b>total.....</b>	<b>92500 €</b>

A continuación se exponen las ventajas e inconvenientes de la aplicación de esta técnica en Andalucía. Para ello se han seguido los criterios establecidos en el contrato que comprenden criterios científico-técnicos y criterios relacionados con:

- Costes económicos tanto del proceso de cálculo como de la adquisición de las variables de entrada
- Costes temporales de evolución y periodicidad del cálculo (escala temporal)
- Escala de trabajo
- Aprovechamiento de la información ya existente en la CMA como variables de entrada del sistema
- Obtención de resultados compatibles con otra información de la CMA (para su integración en la REDIAM)
- Obtención de resultados estándares comparables con estadísticas mundiales, nacionales o regionales.

### Ventajas:

La importancia de la técnica Eddy Covariance radica en que las **medidas** para el cálculo de los flujos se toman desde el aire no generando una perturbación en el ecosistema. Además, tiene capacidad para caracterizar los **intercambios de CO<sub>2</sub> en el conjunto del ecosistema**, mediante la toma de medidas directas del intercambio de CO<sub>2</sub> entre la atmósfera y la superficie. Es capaz de medir automáticamente los intercambios de CO<sub>2</sub> de un ecosistema a una **escala temporal** que va desde la hora a incluso años (Baldocchi 2003).

Como ya se ha comentado anteriormente, la aplicación de esta técnica está **estandarizada a escala internacional** y regional y los resultados obtenidos podrían **compararse** con resultados obtenidos en otros ecosistemas con vegetación similar.

Los resultados obtenidos (intercambio neto de CO<sub>2</sub> y vapor de agua a escala de ecosistema así como información sobre variables meteorológicas y temperatura y humedad del suelo) pueden **integrarse** dentro de la Red de Información Ambiental de Andalucía (**REDIAM**) como un criterio más de cara a la gestión de los usos del suelo. Podría incluirse como un producto similar a los mapas de usos de suelo y cobertura vegetal o como un índice para el seguimiento y gestión de los distintos ecosistemas.

**Existen** en la actualidad un total de **siete torres EC** instaladas **en nuestra región** andaluza cuya información podrían incluirse en una base de datos general y ser **utilizada** de cara a la **gestión** de los usos de suelo existentes o a un mayor conocimiento del ecosistema. Además estas medidas de intercambio neto de CO<sub>2</sub> también se emplean a escala internacional para la **validación y optimización de los modelos** descritos anteriormente (apartado 3.1).

#### Inconvenientes:

Para que las medidas de intercambios de CO<sub>2</sub> y vapor de agua obtenidas con estas técnicas sean fiables, la torre EC y el **terreno** sobre el que se instala deben tener unas **condiciones** determinadas:

- Terreno con vegetación homogénea
- Terreno llano
- Altura de la torre proporcional a la altura y distribución de la vegetación

Además, como esta técnica se basa en la medida de los flujos turbulentos de CO<sub>2</sub> y vapor de agua puede suceder que durante la **noche**, en condiciones de estabilidad atmosférica, no exista turbulencia y por tanto **no se puede medir** este intercambio.

Dado que la frecuencia de medida de los instrumentos instalados en la torre EC es muy elevada (unos 10 Hz), es inevitable la **pérdida de datos** (robo de baterías, avería de instrumentos,...). A pesar de esta deficiencia **la integración anual es posible** gracias a la posibilidad de rellenar estos huecos de

ausencia de datos empleando diversas técnicas de relleno internacionalmente aceptadas (modelos ecofisiológicos (Falge et al., 2001), redes neuronales (Papale and Valentini 2003), distribución marginal (Reichstein et al., 2005), etc...).

La instalación y mantenimiento de la instrumentación así como la obtención de resultados fiables, requiere de **personal técnico cualificado y bien formado**. Este requisito hace que la posible instalación de nuevas torres en la región andaluza suponga un elevado coste económico no sólo como consecuencia de la necesidad de instrumentación (unos 32500 €) sino también como consecuencia de la necesidad de personal. Este requisito da lugar a unos **costes económicos elevados**

#### Calidad de los resultados:

Si se cumplen con los requisitos comentados anteriormente los resultados obtenidos serán de una **alta fiabilidad** ya que se trata de una metodología que mide directamente los intercambios de CO<sub>2</sub> entre atmósfera y suelo sin perturbar el entorno.

### 3.4 MEDIDAS PUNTUALES DE FLUJO DE CO<sub>2</sub> EN SUELO Y HOJAS

Se trata de una metodología que mide directamente y de forma puntual el flujo de CO<sub>2</sub> emitido por el suelo o el intercambio de gases (fotosíntesis y respiración) a nivel de hoja.

#### DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS

Para la medida del flujo de CO<sub>2</sub> emitido por el suelo y los intercambios de gases a nivel de hoja se usan los sistemas de cámaras. Esta técnica es mundialmente empleada. La instrumentación consta de una unidad de control y análisis, donde se encuentra el analizador de gas en el infrarrojo (IRGA) y de una cámara que es la unidad encargada de captar y transportar el aire hasta el IRGA.



Ejemplo de dos de los sistemas de cámaras para la medida de flujo de CO<sub>2</sub> del suelo: LI-8100 (Li-Cor, Lincoln NE) (izq.) y PP systems EGM-4 & SRC-1 (PP systems, Hitchins, UK) (dcha).



Ejemplo de dos de los sistemas de cámaras para la medida de intercambio de gases a nivel de hoja : LI-6400 (Li-Cor, Lincoln NE) (izq.) y CIRAS-2 (PP systems, Hitchins, UK) (dcha).

Para realizar una medida de flujo de CO<sub>2</sub> del suelo se coloca la cámara en el punto donde se desea medir y se programa el tiempo de medición. Tras esto la cámara comienza a cerrarse y se inicia la toma de muestra de aire de suelo para su posterior análisis en la unidad de control. Usando periódicamente este sistema sobre puntos de suelo prefijados podremos estimar la contribución de la respiración del suelo en los procesos de intercambio de gases a nivel de ecosistema.

Para realizar medidas de intercambio de gases a nivel de hoja se cierra la cámara sobre la hoja de la planta seleccionada y se inicia la toma de muestra de aire para su posterior análisis en la unidad de control. Usando este sistema periódicamente sobre individuos seleccionados podremos estimar la contribución de la fotosíntesis y respiración en los procesos de intercambio de gases a nivel de ecosistema.

## **EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA Y PRESUPUESTO**

El precio de estos sistemas de cámara pueden variar desde los 15000€ hasta los 60000€ y requiere de un operario para realizar las campañas de medida en el campo.

A continuación se exponen las ventajas e inconvenientes de la aplicación de esta técnica en Andalucía. Para ello se han seguido los criterios establecidos en el contrato que comprenden criterios científico-técnicos y criterios relacionados con:

- Costes económicos tanto del proceso de cálculo como de la adquisición de las variables de entrada
- Costes temporales de evolución y periodicidad del cálculo (escala temporal)
- Escala de trabajo

- Aprovechamiento de la información ya existente en la CMA como variables de entrada del sistema
- Obtención de resultados compatibles con otra información de la CMA (para su integración en la REDIAM)
- Obtención de resultados estándares comparables con estadísticas mundiales, nacionales o regionales.

### Ventajas:

Estas técnicas nos permiten **medir el flujo de CO<sub>2</sub>** procedente del suelo y el intercambio de gases a nivel de hoja, **de forma directa** (Davidson et al., 2002). Además, su flexibilidad a la hora de seleccionar una localización determinada, permite su utilización en espacios de reducido tamaño (Butnor et al., 2005).

Estos sistemas de cámaras **se emplean** también **para verificar** las medidas de flujo de CO<sub>2</sub> obtenidas a escala de ecosistema con las torres EC, (Kowalski et al., 2003) y como **variable de entrada** en modelos de dinámica de vegetación.

### Inconvenientes:

El **carácter manual** de estas técnicas tradicionales y la necesaria modificación del entorno para la realización de las medidas, limitan mucho su uso y la fiabilidad de los resultados obtenidos. Además, para que estas medidas puedan extrapolarse al conjunto del ecosistema, debemos realizar un número de medidas puntuales representativas.

### Calidad de los resultados:

Los resultados obtenidos por estas técnicas son **fiables** al tratarse de medidas puntuales y directas. No obstante, la información obtenida **no es útil por sí sola** para lograr nuestro objetivo de estimación del intercambio de CO<sub>2</sub> a nivel de ecosistema. Pero pueden ser de gran importancia para la agregación o diseño de modelos.

## 3.5 ESTIMACIÓN DEL CARBONO Y EL CO<sub>2</sub> EQUIVALENTE CONTENIDO EN LA BIOMASA Y SUELOS FORESTALES

Los cambios en el contenido en C de la masa forestal (producción neta de biomasa, NBP) pueden estimarse mediante el uso de modelos basados en inventarios forestales nacionales que recogen información acerca del incremento de volumen en troncos y tala (Kauppi et al., 2002; Nabuurs et al., 2003).

### DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

Estos modelos usan la información contenida en los inventarios forestales sobre el incremento de volumen en troncos para obtener a partir de sencillos factores de conversión (Liski et al., 2000; Nabuurs et al., 2003) la productividad primaria neta del ecosistema (NPP). En estos modelos se incluyen los fenómenos de tala pero se excluye la contribución de la vegetación del sotobosque porque se considera que tiene una escasa contribución en la NPP de los bosques.

A nivel europeo se estima que el 70% de la asimilación de carbono en bosques se acumula en los árboles y el 30% en el suelo. No obstante, si comparamos esta estimación con medidas directas del contenido de carbono de materia orgánica muerta, suelos (Merino et al., 2007) y respiración heterotrófica, observamos que existe una subestimación de los resultados obtenidos. (Janssens et al., 2003).

A nivel nacional se destaca el trabajo realizado por El Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) que en el año 2003 desarrolló un protocolo metodológico para poder realizar estimaciones de carbono en las principales especies forestales arbóreas españolas. Basándose en



esta estrategia, se puede determinar la cantidad de carbono y de CO<sub>2</sub> atmosférico equivalente que hay en distintas formaciones vegetales inespecíficas (Montero et al., 2005). El procedimiento general consiste en inventariar parcelas experimentales midiendo diámetros y alturas, para estimar volúmenes y biomásas por unidad de superficie. A continuación se calcula el carbono en madera (contenido en carbono del 50%), raíces y hojas (contenido de carbono 25-40%).

### EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA Y PRESUPUESTO

Los inventarios forestales nacionales están disponibles para la Consejería de Medio Ambiente por lo que la aplicación de estos modelos no supondría un gasto adicional. Únicamente debemos incluir el coste de la contratación de un **técnico**.

A continuación se exponen las ventajas e inconvenientes de la aplicación de esta técnica en Andalucía. Para ello se han seguido los criterios establecidos en el contrato que comprenden criterios científico-técnicos y criterios relacionados con:

- Costes económicos tanto del proceso de cálculo como de la adquisición de las variables de entrada
- Costes temporales de evolución y periodicidad del cálculo (escala temporal)
- Escala de trabajo
- Aprovechamiento de la información ya existente en la CMA como variables de entrada del sistema
- Obtención de resultados compatibles con otra información de la CMA (para su integración en la REDIAM)

- Obtención de resultados estándares comparables con estadísticas mundiales, nacionales o regionales.

### Ventajas:

Como se ha comentado anteriormente, los inventarios forestales están disponibles para la CMA por lo que la aplicación de estos modelos **no** supone un **coste adicional**. Además, se trata de un modelo aceptado a escala europea e incluso internacional, por lo que los **resultados obtenidos** pueden **compararse** con otros resultados obtenidos en bosque de otras regiones.

Estos modelos se han aplicado con éxito en Europa, suponiendo que la contribución de otros usos de suelo (plantaciones jóvenes, áreas urbanas, matorral) asimilan una cantidad de carbono despreciable comparada con los bosques europeos (Janssens et al., 2001).

### Inconvenientes:

**Escala temporal:** al trabajar con inventarios forestales los intercambios de CO<sub>2</sub> estimados hacen referencia a una variabilidad interanual de **5-10 años**.

Los artículos publicados relacionados con la aplicación de estos modelos remarcan una **alta incertidumbre** en la estimación del contenido de carbono en los **suelos** (Janssens et al., 2001). No obstante destacamos la **posibilidad de optimizar los resultados** obtenidos por este modelo a nivel de suelo. Un método ya realizado en nuestra región se basa en la toma de muestras de suelo a distintas profundidades para estimar el contenido en carbono orgánico e inorgánico (SOC y SIC respectivamente) (**Díaz-Hernández et al., 2003**)

### Calidad de los resultados:

Aplicando estos sencillos modelos basados en inventarios forestales obtenemos una estimación de la producción neta de biomasa en nuestros bosques, NBP. Si tenemos en cuenta que en la región Andaluza únicamente un 8% del total de la superficie está destinada a arbolado denso (frente a un 30% de matorral o 31% de cultivo en secano y olivar) **este modelo no puede aplicarse por si sólo** para estimar los intercambios de carbono a escala de la región andaluza.

## BIBLIOGRAFÍA

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., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, D., Anthoni, P. M., Bernhofer, C., Davis, K. J., Evans, R., Fuentes, J. D., Goldstein, A. H., Katul, G. G., Law, B. E., Lee, Z., Malhi, Y., Meyers, T. P., Munger, W., Oechel, W., Paw U, K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S. B., Vesala, T., Wilson, K. B. y Wofsy, S. C. 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.

Butnor, J. R., Johnsen, K. H. y Maier, C. A. 2005. Soil properties differently influence estimates of soil CO<sub>2</sub> efflux from three chamber-based measurement systems. *Biogeochemistry*, 73: 283-301.

Ceulemans, R., Kowalski, A. S., Berbigier, P., Dolman, A. J., Grelle, A., Janssens, I. A., Lindroth, A., Moors, E. J., Rannik, Ü. y Vesala, T. 2003. Coniferous Forests (Scots and Maritime Pine): Carbon and Water Fluxes, Balances, Ecological and Ecophysiological Determinants. *Ecological Studies*, 163: 71-95.

Conen, F., Zerva, A., Arrouays, D., Jolivet, C., Jarvis, P. G., Grace, J. y Mencuccini, M. (2004). The carbon balance of forest soils: detectability of changes in soil carbon stocks in temperate and Boreal forests. The Carbon Balance of Forest Biomes. (H. Griffith, P.G. Jarvis, Eds.), Bios Scientific: 233-247.

Davidson, E. A., Savage, K., Verchot, L. V. y Navarro, R. 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 21-37.

Díaz-Hernández, J. L., Barahona Fernández, E. y Linares González, J. 2003. Organic and inorganic carbon in soils of semiarid regions: a case study from the Guadix-Baza basin (Southeast Spain). *Geoderma*, 114: 65-80.

Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. y Tanabe, K. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories. Japan, Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

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

Janssens, I. A., Freibauer, A., Ciais, P., Smith, P., Nabuurs, G.-J., Folberth, G., Schlamadinger, B., Hutjes, R. W. A., Ceulemans, R., Schulze, E.-D., Valentini, R. y Dolman, A. J. 2003. Europe's Terrestrial Biosphere Absorbs 7 to 12% of European Anthropogenic CO<sub>2</sub> Emissions. *Science*, 300: 1538-1542.

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

Jung, M., Le Maire, G., Zaehle, S., Luyssaert, S., Vetter, M., Churkina, G., Ciais, P., Viovy, N. y Reichstein, M. 2007. Assessing the ability of three land ecosystem models to simulate gross carbon uptake of forests from boreal to Mediterranean climate in Europe. *Biogeoscience*, 4: 647-656.

Kauppi, P., Mielikäinen, K. y Kuusela, K. 2002. Biomass and Carbon budget of European Forests, 1971 to 1990. *Science*, 256(5053): 70.

Kowalski, A. S., Serrano-Ortiz, P., Janssens, I. A., Sánchez-Moral, S., Cuezva, S., Domingo, F. y Alados-Arboledas, L. 2008. Can flux tower research neglect 1 geochemical CO<sub>2</sub> exchange? *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(6-7): 1045-1054.

Kowalski, S., Sartorem, M., Burlett, R., Berbigier, P. y Loustau, D. 2003. The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. *Global Change Biology*, 9: 1051-1065.

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

Liski, J., Karjalainen, A., Pussinen, A., Nabuurs, G.-J. y Kauppi, P. 2000. Trees as carbon sinks and sources in the European Union. *Environmental Science and Policy*, 3: 91-97.

Mahadevan, P., Wofsy, S. C., Matross, D. M., Xiao, X., Dunn, A. L., Lin, J. C., Gerbig, C., Munger, J. W., Chow, V. Y. y Gottlieb, E. W. 2008. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM). *Global Biogeochemical Cycles*, 22: GB2005.

Marquis, M. y Tans, P. 2008. Carbon Crucible. *Science*, 320: 420-421.

Matross, D. M., Andrews, A., Pathmathevan, M., Gerbig, C., Lin, J. C., Wofsy, S. C., Daube, B. C., Gottlieb, E. W., Chow, V. Y., Lee, J. T., Zhao, C., Bakwin, P. S., Munger, J. W. y Hollinger, D. Y. 2006. Estimating regional carbon exchange in New England and Quebec by combining atmospheric, ground-based and satellite data. *Tellus*, 58B: 344-358.

Mendoza-Vega, J., Karlton, E. y Olsson, M. 2003. Estimations of amounts of soil organic carbon and fine root carbon in land use and land cover classes, and soil types of Chiapas highlands, Mexico  
Jorge Mendoza-Vega\*, Erik Karlton, Mats Olsson. *Forest Ecology and Management*, 177: 191-206.

Merino, A., Real, C., Álvarez-González, J. G. y Rodríguez-Gutián, M. A. 2007. Forest structure and C stocks in natural *Fagus sylvatica* forest in southern Europe: The effects of past management. *Forest Ecology and Management*, 250: 206-214.

Montero, G., Ruiz-Peinado, R. y Muñóz, M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. *Monografías INIA n° 13*.

Nabuurs, G.-J., Scheelhaas, M.-J., Godefridus, Mohrens, M. J. y Field, C. 2003. Temporal evolution of the European forest sector carbon sink from 1950 to 1999. *Global Change Biology*, 9: 152-160.

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

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T. y Kruger, D. (2003). Good Practice Guidance for LULUCF (programa del IPCC sobre inventarios naturales de gases del efecto invernadero). Suiza, Organización Meteorológica Mundial (OMM) para el IPCC.

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

Reichstein, M., Tenhunen, J. D., Roupsard, O., Ourcival, J. M., Rambal, S., Dore, S. y Valentini, R. 2002. Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm Oak forests: drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology*, 16: 27-39.

Rey, A., Pepsikos, C., Jarvis, P. y Grace, J. 2005. The effect of soil temperature and soil moisture on carbon mineralisation rates in a Mediterranean forest soil. *European Journal of Soil Science*, 56: 589-599.

Sitch, S., Smith, B., Prestice, I. C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J. O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M. T., Thonicke, K. y Venevski, S. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9: 161-185.

Thornton, P. E., Law, B. E., Gholz, H. L., Clark, K. L., Falge, E., Ellsworth, D. S., Goldstein, A. H., Monson, R. K., Hollinger, D., Falk, M., Chen, J. y Sparks, J. P. 2003. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 185-222.

Villalobos, F. J. 1997. Correction of eddy covariance water vapor flux using additional measurements of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88: 77-83.

Washenfelder, R. A., Toon, G. C., Blavier, J.-F., Yang, Z., T., A. N., Wennberg, P. O., Vay, S. A., Matross, D. M. y Daube, B. C. 2006. Carbon dioxide column abundances at the Wisconsin Tall Tower site. *Journal of geophysical research*, 111: D22305.

Wofsy, S. C., Goulden, M. L., Munger, J. W., Fan, S.-M., Bakwin, P. S., Daube, B. C., Bassow, S. L. y Bazzaz, F. A. 1993. Net Exchange of CO<sub>2</sub> in a Mid-Latitude Forest. *Science*, 260: 1314-1317.