

Tesis defendida por
Alejandro Hiram Cueva Rodríguez
y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rodrigo Vargas Ramos
Codirector del Comité

Dr. Stephen Holmes Bullock Runquist
Codirector del Comité

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Miembro del Comité

Dr. Jonás de Dios De Basabe Delgado
Miembro del Comité

Dr. Antonio González Fernández
Coordinador Programa de Posgrado en
Ciencias de la Tierra

Dr. Jesús Favela Vara
Director Dirección de Estudios de
Posgrado

Agosto de 2013

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



Programa de Posgrado en Ciencias
En Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales

Análisis multisitio y multimodelo de errores aleatorios en flujos de CO₂ de suelo bajo diferentes
condiciones de humedad

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Alejandro Hiram Cueva Rodríguez

Ensenada, Baja California, México
2013

Resumen de la tesis de Alejandro Hiram Cueva Rodríguez, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Análisis multisitio y multimodelo de errores aleatorios en flujos de CO₂ de suelo bajo diferentes condiciones de humedad

Resumen aprobado por:

Dr. Rodrigo Vargas Ramos
Codirector de Tesis

Dr. Stephen Holmes Bullock Runquist
Codirector de Tesis

Un componente principal de la respiración ecosistémica son los flujos de CO₂ de suelo (F). El aumento mundial en la aplicación de mediciones automáticas a largo plazo a través de redes de monitoreo ha dado como resultado crecientes bases de datos donde la caracterización de las incertidumbres de estas mediciones es una necesidad. Las mejoras en la tecnología así como calibración constante del equipo pueden minimizar los errores sistemáticos en las mediciones, pero los errores aleatorios (ϵ) generalmente no son tomados en cuenta. El objetivo principal del presente estudio fue caracterizar ϵ en F a través de distintas condiciones de humedad y ecosistemas. Con datos de la concentración de CO₂ a diferentes profundidades, marcando un gradiente, se calculó F utilizando dos métodos distintos en cuatro ecosistemas diferentes. Los métodos utilizados tienen una representación similar del proceso físico de difusión de gases dentro del suelo y tienen parámetros de entrada similares. Los resultados muestran que no existen diferencias significativas en F con base en promedios diarios al utilizar ambos métodos. Al momento de calcular ϵ , no se encontraron diferencias significativas entre los métodos para calcular F . Cuando se clasificó ϵ con base en diferentes condiciones de humedad se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los métodos en condiciones secas y húmedas. Además, la distribución de ϵ , independientemente del método usado o ecosistema, se ajusta mejor a una distribución doble exponencial, su promedio es cercano a cero, y no tienen varianza constante. La contribución de ϵ a F sugiere una potencial sobreestimación de F en las sumas anuales. Las principales contribuciones de los resultados presentados en esta investigación son: a) proveer fundamentos para incorporar información sobre ϵ en problemas de asimilación de datos; y b) los resultados pueden ser utilizados para estimar intervalos de confianza en F a diferentes escalas temporales (e.g., diaria, mensual, anual).

Palabras clave: **flujos de carbono, respiración de suelo, incertidumbres, método del gradiente**

Abstract of the thesis presented by Alejandro Hiram Cueva Rodríguez as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Earth Science with orientation in Environmental Geoscience

A multisite and multimodel analysis of random errors in soil CO₂ efflux across soil water conditions

Abstract approved by:

Dr. Rodrigo Vargas Ramos
Thesis Codirector

Dr. Stephen Holmes Bullock Runquist
Thesis Codirector

A principal component of ecosystem respiration is the soil CO₂ efflux (F). The global increase in application of long-term automatic measurements through monitoring networks had resulted in growing datasets where characterization of uncertainties is a need. Technology development as well as constant equipment calibration can minimize systematic errors in measurements, but random errors (ϵ) are generally not taken into account. The main objective of the present study was to characterize ϵ in F in different soil water conditions and ecosystems. To calculate F , two different approaches are used in four different ecosystems. The approaches used have a similar representation of the physical process of gas diffusion within the soil and have similar input parameters. The results show that there are not significant differences in F on daily means between both approaches to calculate F . When ϵ is classified by soil water conditions, there are significant differences between approaches in dry and wet conditions. Furthermore, the distribution of ϵ , regardless of the approach and ecosystem, is better explained by a double-exponential distribution, it has a mean close to zero, and has no constant variance. The contribution of ϵ to F suggests a potential overestimation of F in annual sums. The most relevant implications from the results presented in this research are: a) to provide a foundation to incorporate information of random errors and uncertainties in model-data fusion; and b) the results can be used to estimate confidence intervals of F at different time scales (e.g., daily, monthly, annual).

Keywords: **carbon fluxes, soil respiration, uncertainties, gradient method**

Dedicatoria

“A una persona mayor:

Pido perdón a los niños por haber dedicado este libro a una persona mayor. Tengo una buena excusa: esta persona mayor es el mejor amigo que tengo en el mundo. Tengo otra excusa: esta persona mayor es capaz de comprenderlo todo, incluso libros para niños. Tengo una tercera excusa: esta persona mayor vive en México, donde pasa hambre y frío. Y verdaderamente necesita mucho consuelo. Si todas estas razones no son suficientes, querría dedicar este libro al niño que en otro tiempo fue esta persona mayor. Todas las personas mayores han sido niños (pero pocas de ellas lo recuerdan. Corrijo, entonces, mi dedicatoria:

A esa persona mayor, cuando era pequeña”

Modificado de:

Léon Werth

Dedicatoria de Le Petit Prince (1943)

“On two occasions I have been asked -Pray, Mr. Babbage, if you put into the machine wrong figures, will the right answers come out?- ... I am not able rightly to apprehend the kind of confusion of ideas that could provoke such a question”

Charles Babbage

Passages from the Life of a Philosopher (1894)

"C'est une question de discipline, me disait plus tard le petit prince. Quand on a terminé sa toilette du matin, il faut faire soigneusement la toilette de la planète"

Antoine de Saint-Exupéry

Le Petit Prince (1943)

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, que me han apoyado en cada una de las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, sin su apoyo constante no hubiera llegado hasta aquí.

Agradezco al CICESE así como al Departamento de Ciencias de la Tierra, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado, pero aún más agradezco a Martha Elva Barrera, Secretaria del Posgrado de Ciencias de la Tierra, que siempre estuvo ahí para ayudarnos.

Agradezco al CONACyT, por el financiamiento otorgado a través de una beca de manutención (#264414) y al haberme concedido su beca mixta para realizar un intercambio académico internacional.

Agradezco a la Universidad de Delaware por recibirme en mi intercambio académico.

Agradezco al Dr. Rodrigo Vargas, por el apoyo durante el desarrollo de esta investigación, por sus enseñanzas en el salón de clase, por enseñarme otra pregunta fundamental en el mundo de la ciencia: *and so what?* Así como por todos los consejos, tanto personales como académicos, sin duda su experiencia ha contribuido enormemente a mi desarrollo profesional, ¡Muchas gracias!

Al comité conformado por el Dr. Stephen H. Bullock, Dr. Jonás De Basabe y Dr. David Rivas, por su valioso apoyo y observaciones durante el desarrollo de este trabajo.

I am thankful to Dr. Michael Bahn, Dr. Marcy Litvak and Dr. Jukka Pumpanen, for sharing with me their data and experience, as well as for their insightful comments and feedback.

A Lluvia, por el amor que me ha dado todo este tiempo, por su apoyo y ayuda, este sigue siendo un claro ejemplo del que persevera alcanza.

A mis compañeros de generación de la Maestría en Ciencias de la Tierra 2011-2013, la última generación que hizo propedéutico ¡Hasta siempre!

A mis amigos Francisco Limón, Leopoldo Gutiérrez y Marco Bartens. Tengo que agradecer en especial a cuatro personas: Enrico, por sus consejos durante el desarrollo de mis estudios de posgrado; Zulia, por demostrarme que el mundo es muy pequeño; Ana Karina, por su amistad sincera y capacidad de resolver inundaciones de casas; y a Ramsés, que sigue sin levantarse temprano y pretende que empuje el bocho de nuevo.

A la familia Vargas-Seyfferth (incluyendo a Colette), por recibirme y haberme abierto las puertas de su casa. Algún día haré lo mismo por otra persona.

Por último, te agradezco a ti, lector o lectora, que estás leyendo esta tesis y no has dejado que se convierta en parte de la literatura gris, espero y te sirva de algo.

Tabla de Contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	viii
 Capítulo 1. Introducción	
1.1 Introducción.....	1
1.2 Pregunta de investigación	3
1.3 Objetivo general.....	4
1.4 Objetivos específicos.....	4
1.5 Hipótesis.....	4
 Capítulo 2. Metodología	
2.1 Sitios de estudio	6
2.2 Métodos para determinar F	7
2.3 Estimación de errores aleatorios.....	10
2.4 Análisis de datos.....	11
 Capítulo 3. Resultados	
3.1 Estimación de flujos de CO_2 de suelo.....	14
3.2 Distribución de los errores aleatorios (ϵ).....	15
3.3 Errores aleatorios y su relación con θ y F	16
3.4 Errores aleatorios y su contribución total a los flujos de CO_2 de suelo	20
 Capítulo 4. Discusión	
4.1 Discusión.....	24
 Conclusiones.....	28
 Referencias bibliográficas.....	29

Lista de figuras

Figura		Página
1	Promedios diarios de F y θ	14
2	Distribución de frecuencias de los errores aleatorios (ε) totales...	16
3	Relación de la desviación estándar ($(\sqrt{2})\beta$) de los errores aleatorios (ε) y los flujos de CO_2 de suelo (F).....	20
4	Relación de la suma acumulada de los errores aleatorios (ε) contra el promedio pareado de los flujos de CO_2 de suelo.....	21
5	Relación del promedio parcial de los errores aleatorios (ε) contra el promedio pareado de los flujos de CO_2 de suelo.....	22

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Información de los sitios de estudio utilizados en el análisis.....	8
2	Propiedades estadísticas de los errores aleatorios (ϵ) totales...	16
3	Propiedades estadísticas de los errores aleatorios (ϵ) clasificados de acuerdo a los diferentes intervalos de contenido de agua en el suelo (θ).....	18
4	Contribución de los errores aleatorios (ϵ) totales a la suma total y la suma total de la desviación estándar de los flujos de CO_2 de suelo.....	23

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

El incremento del dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera a lo largo del último siglo debido a las actividades antropogénicas está relacionado con el incremento de la temperatura media (IPCC, 2007), así como del cambio en los patrones de precipitación a nivel mundial (Knapp et al., 2008). Mejorar el entendimiento del ciclo del carbono (C) es entonces científica y políticamente importante (Chapin et al., 2009). Dado que uno de los mayores almacenes de C es el suelo (Davidson y Janssens, 2006) el entender su dinámica es un tema crítico ya que debido al incremento en la temperatura global los flujos de CO_2 de suelo podrían aumentar, retroalimentado al cambio climático de forma positiva. Sin embargo todavía existe un alto nivel de incertidumbre sobre este tema (Cox et al., 2000; Heimann y Reichstein, 2008) .

Aportando aproximadamente $98 \pm 12 \text{ Pg C a}^{-1}$ ($P=10^{15}$) (Bond-Lamberty y Thomson, 2010), siendo superados solamente por la fotosíntesis, los flujos de CO_2 entre el suelo y la atmósfera (también nombrados respiración de suelo) representan la segunda mayor vía de intercambio de C entre los ecosistemas y la atmósfera (Bond-Lamberty y Thomson, 2010). Esto supera por un orden de magnitud a las aportaciones de CO_2 debido a la quema de combustibles fósiles (Reichstein y Beer, 2008). Los flujos de CO_2 que emanan del suelo (F) son producidos por la combinación de los procesos metabólicos de los microorganismos (respiración heterótrofa) que se desarrollan en las capas más superficiales de la superficie terrestre (capas orgánicas superficiales y horizontes minerales) (Buchmann, 2000) así como por la respiración de las raíces y micorrizas (respiración autótrofa) (Ryan y Law, 2005). Los flujos de CO_2 son un proceso complejo que varía en distintas escalas espaciales y temporales (Vargas et al., 2011b) dado que están influenciados por factores bióticos, como la cantidad y la calidad de la hojarasca del suelo, así como la cantidad de C que asignen las plantas hacia las raíces (McCulley et al., 2007), y por factores abióticos, como la temperatura y humedad del suelo (Bond-Lamberty et al., 2004; Kuzyakov, 2002); aunado a que la difusión del

CO₂ depende de otros factores físicos del suelo como la porosidad y la textura (Pumpanen et al., 2003). Por lo anterior, cuantificar F de manera precisa y con la menor incertidumbre posible se ha convertido en un reto para la comunidad científica.

Dado el incremento de las redes de monitoreo a nivel mundial de variables climatológicas y ecosistémicas (e.g., FLUXNET (Baldocchi et al., 2001), NEON (Kampe et al., 2010)) y a la adquisición de grandes volúmenes de datos de distintos ecosistemas, se ha vuelto una necesidad caracterizar las incertidumbres de las mediciones y los modelos de flujos ecosistémicos (Hollinger y Richardson, 2005). Para el caso de los flujos de CO₂ del suelo, normalmente solo se reporta el valor de F sin tomar en cuenta las incertidumbres de las mediciones. El flujo medido de CO₂ del suelo (F_M) es un compuesto del valor del flujo de CO₂ (F), errores sistemáticos (δ) y errores aleatorios (ϵ), de tal forma que $F_M = F + \delta + \epsilon$, tal y como es descrito para flujos a nivel ecosistémico (Richardson et al., 2006). Dado que las mejoras en la tecnología y la constante calibración de los instrumentos pueden minimizar δ , este estudio estará enfocado en ϵ , cuyas características son generalmente desconocidas para F .

Son pocos los estudios que se han hecho sobre ϵ acerca de flujos de CO₂, sesgándose la mayoría a técnicas de escalas ecosistémicas (Hagen et al., 2006; Hollinger y Richardson, 2005; Raupach et al., 2005; Richardson et al., 2006; Richardson et al., 2008), siendo aún menor el número de análisis de ϵ en F (Phillips et al., 2010; Savage et al., 2008). El conocer los valores de ϵ para las distintas mediciones de flujos de CO₂ permitirá mejorar los modelos de cambio climático, disminuir la incertidumbre de sus proyecciones (House et al., 2008), validar modelos ecosistémicos, así como mejorar los análisis de síntesis entre sitios de estudio (Richardson y Hollinger, 2005; Richardson et al., 2006).

La comprensión de los mecanismos que regulan F ha aumentado en los últimos años debido a las nuevas técnicas de medición continuas que permiten monitorear distintas variables a grandes escalas temporales (desde segundos hasta años) (Vargas et al., 2011b). Existen dos técnicas principales de medición continua para cuantificar F : la técnica de cámaras y la técnica de gradiente. La técnica de cámaras de respiración

consiste en encerrar un área conocida de suelo y medir el aumento en la concentración de CO₂ por un tiempo determinado dentro de un volumen conocido (Cueva-Rodriguez et al., 2012; Davidson et al., 2002; Pumpanen et al., 2004). La técnica del gradiente consiste en realizar mediciones de la concentración de CO₂ dentro del suelo a distintas profundidades (e.g., 2, 8, 16 cm), para después estimar el flujo de CO₂ en la superficie (Vargas et al., 2010; Tang et al., 2003). Este estudio se enfocará en la técnica de gradiente.

La técnica del gradiente para estimar F está basada en mediciones de la concentración de CO₂ a diferentes profundidades dentro del suelo y cálculos basados en la primera ley de difusión de Fick (Pumpanen et al., 2003; Pumpanen et al., 2008; Tang et al., 2003; Vargas et al., 2010). Esta técnica está influenciada por la variación del contenido de agua en el suelo (θ), dado que los cambios de θ afectan las condiciones del aire contenido en los poros del suelo, afectando la difusión del CO₂ (Šimůnek y Suarez, 1993). Esto es de particular importancia dado que los patrones de precipitación y de disponibilidad de agua en los ecosistemas cambia tanto temporal como espacialmente, afectando procesos ecosistémicos como F (Vargas et al., 2012). Dado que la técnica del gradiente para medir F está influenciada por θ (Skopp et al., 1990), conocer su sensibilidad y los patrones de ϵ ante estos cambios de disponibilidad hídrica es un asunto de importancia metodológica, científica y política.

1.2 Pregunta de investigación

La pregunta principal de esta investigación es ¿Cuáles son los patrones de ϵ para diferentes modelos que calculan F en diferentes rangos de θ y en distintos ecosistemas?

1.3 Objetivo general

El objetivo principal de esta investigación es estimar los errores aleatorios en distintos métodos para calcular flujos de CO₂ de suelo mediante la técnica del gradiente en distintos ecosistemas. Esto a través de distintas condiciones de humedad independientes para cada sitio de estudio para así determinar la contribución total de los errores aleatorios para las sumas totales de los flujos de CO₂ de suelo.

1.4 Objetivos específicos

Para contestar la pregunta de investigación se han establecido tres objetivos:

- a) Identificar diferencias en la estimación de F entre dos modelos en cuatro diferentes ecosistemas (bosque templado mixto, bosque boreal de coníferas, pastizal templado, y un bosque árido).
- b) Determinar patrones de ε en distintos rangos de θ en los distintos ecosistemas estudiados.
- c) Determinar la relación entre ε y θ o la magnitud de F en los diferentes ecosistemas estudiados.

1.5 Hipótesis

Se han postulado las siguientes hipótesis:

- i. Los métodos para calcular flujos de CO₂ de suelo tienden a calcular resultados similares debido a que representan de manera similar los procesos físicos así

como por tener los mismos parámetros de entrada (e.g., concentraciones de CO_2 , humedad de suelo, propiedades físicas del suelo).

- ii. Los valores de ε tienden a ser similares entre los modelos debido a que representan de manera similar los procesos físicos así como por tener los mismos parámetros de entrada (e.g., concentraciones de CO_2 , humedad de suelo, propiedades físicas del suelo).
- iii. Las diferencias entre los valores de ε para cada modelo tienden a ser mayores a valores altos y bajos que a valores intermedios de θ debido a los cambios de la difusión del CO_2 en el suelo.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Sitios de estudio

Los datos del presente análisis fueron obtenidos de cuatro sitios alrededor del mundo en diferentes ecosistemas (Tabla 1). El primer sitio de estudio es *The James San Jacinto Mountains Reserve* (Jre; Vargas et al., 2008), que es parte del sistema de reservas naturales de las Universidades de California, Estados Unidos. El suelo en Jre es clasificado como entisol. El ecosistema predominante en Jre es un bosque mixto de coníferas y encinos, sus especies vegetales principales son: *Quercus kelloggii*, *Colacedrus decurrens*, *Arctostaphulos pringlei*, *Pinus lambertiana* y *Eriogonum wrightii*. Jre cuenta con una precipitación media anual (PMA) de 507 mm y una temperatura media anual (TMA) de 10.3 °C. El sitio de Jre cuenta con tres sensores de estado sólido para medir la concentración de CO₂ en el suelo (CARBOCAP, GMM 220, Vaisala, Helsinki, Finlandia), así como sensores de temperatura y humedad (ECHO, Decagon, Pullman, WA, EEUU) dentro del suelo a 2, 8 y 16 cm de profundidad.

El segundo sitio de estudio se encuentra localizado en Hyytiälä (Hyy; Pumpanen et al., 2008), al sur de Finlandia, en la estación SMEAR II (*Station for Measuring Forest-Ecosystem-Atmosphere Relations*). El suelo en Hyy está clasificado como podzol haplico. El ecosistema predominante en Hyy es un bosque boreal de coníferas de 47 años. Las especies vegetales principales de Hyy son: *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Dicranum polysetum*, *Hylocomium splendens* y *Pleurozium scheberi*. Hyy cuenta con una PMA de 700 mm y una TMA de 2.9 °C. El sitio de Hyy cuenta con cuatro sensores de estado sólido que miden la concentración de CO₂ dentro del suelo (CARBOCAP, GMM 220, Vaisala, Helsinki, Finlandia) así como sensores de temperatura (Philips KTY, Eindhoven, Países Bajos) y de humedad (TDR-100, Campbell Scientific Ltd., EEUU) dentro del suelo a 0, 2, 12 y 20 cm de profundidad.

El tercer sitio se encuentra en el valle de Stubai (Stu; Bahn et al., 2006), localizado en los alrededores de Neusfit, Austria. El suelo en Stu es clasificado como cambisol districo. El ecosistema predominante en Stu es un matorral templado. Las

especies vegetales principales de Stu son: *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Phleum pratensis*, *Trisetum flavescens*, *Ranunculus acris*, *Taraxacum officinale*, *Trifolium pretense*, *Trifolium repens* y *Carum carvi*. Stu cuenta con una PMA de 1097 mm y una TMA de 3 °C. El sitio de Stu cuenta con dos sensores de estado sólido que miden la concentración de CO₂ dentro del suelo (CARBOCAP, GMT 222, Vaisala, Helsinki, Finlandia), así como sensores de temperatura y humedad (TDR, Campbell Scientific Ltd., EEUU) dentro del suelo a 5 y 10 cm de profundidad.

El cuarto sitio está localizado en el *Heritage Land Conservancy Pinyon Juniper Woodland*, Nuevo México (Nme; Anderson-Teixeira et al., 2011) en una reserva ecológica para investigación a largo plazo (*Long Term Ecological Research*), Estados Unidos. El suelo en Nme es clasificado como alfisol ustalf. El sitio de Nme es un bosque árido de piñon y enebro. Las especies principales de Nme son: *Pinus edulis* y *Juniperus monosperma*. Nme cuenta con una PMA de 420 mm y una TMA de 10.8 °C. El sitio de Nme cuenta con 4 sensores de estado sólido que miden la concentración de CO₂ en el suelo (CARBOCAP, GMM 222, Vaisala, Helsinki, Finlandia), así como sensores de temperatura y humedad (EC-TM Decagon Devices Inc., Pullman, WA, EEUU) dentro del suelo a 5, 10, 20 y 40 cm de profundidad.

2.2 Métodos para determinar F

Se utilizaron dos métodos diferentes para calcular F propuestos por Vargas et al. (2010) (de ahora en adelante A1) y Pumpanen et al. (2008) (de ahora en adelante A2). Un ensamble de esos dos métodos (i.e., el promedio de A1 y A2; ENS) fue usado para probar la cancelación de los errores. Los cálculos de F para A1 y A2 están basados en la ley de difusión de Fick:

Tabla 1. Información de los sitios de estudio utilizados en el análisis.

Sitio	Latitud	Longitud	AD	Tipo de suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	DA (mg/m ³)	P (m ³ /m ³)	Tipo de vegetación	TMA (°C)	PMA (mm)
Jre	33° 48'N	-116° 46'W	2006	Entisol	83	10	7	1.2	0.55	Bosque templado	10.3	507
Hyy	61° 51'N	241° 17'W	2010	Podzol haplico	69	20	11	0.6	0.61	Bosque boreal	2.9	700
Stu	47° 07'N	11° 19'W	2006	Cambisol dístico	42	31	27	0.91	0.66	Pastizal templado	3	1097
Nme	34° 21'N	-106° 16'W	2010	Alfisol	35	40	25	1.16	0.56	Bosque Semiárido	10.8	420

AD: Año de Datos; DA: Densidad Aparente del suelo; P: Porosidad del suelo; TMA: Temperatura Media Anual; PMA: Precipitación Media Anual.

$$F = -D_s \frac{\partial C}{\partial Z}, \quad (1)$$

donde F es el flujo de CO₂ de suelo (μmol m⁻² s⁻¹); D_s es el coeficiente de difusión (m² s⁻¹); C es la concentración molar de CO₂ (μmol m⁻³); y Z es la profundidad (m). Para calcular el flujo de CO₂ de suelo, A1 usa el modelo de difusión propuesto por Moldrup et al., (1999):

$$\frac{D_s}{D_1} = \phi^2 \left(\frac{\xi}{\phi} \right)^{\beta S}, \quad (2)$$

y A2 usa un modelo de difusión propuesto por Troeh et al., (1982):

$$\frac{D_s}{D_2} = \left(\frac{\xi - u}{1 - u} \right)^h, \quad (3)$$

donde D_1 es el efecto de la temperatura y la presión atmosférica:

$$D_1 = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.75} \left(\frac{P_0}{P} \right), \quad (4)$$

D_2 es el efecto de la temperatura:

$$D_2 = 1.997 \text{ Log}(T) - 9.7273, \quad (5)$$

y D_0 es un valor de referencia ($1.47 \times 10^{-15} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) a una temperatura de referencia T_0 (293.15 K) y presión de referencia P_0 (1013 hPa); T es la temperatura (K) y P es la presión atmosférica (Pa); β es una constante ($\beta=2.9$); S = arena+limo; u y h son constantes que describen la tortuosidad dentro del suelo (grado de curvas o rodeos que tiene) obtenidos de la literatura (Glinski y Stepniewski, 1985); ξ es el aire contenido en los poros del suelo:

$$\xi = \phi - \theta \quad (6)$$

y ϕ es la porosidad:

$$\phi = 1 - \frac{\text{Densidad Aparente}}{2.65 \text{ g cm}^{-3}}. \quad (7)$$

Ambos métodos incorporan el coeficiente de difusión de los gases en diferentes profundidades del suelo (e.g., 2-8, 8-16 cm) para calcular el flujo total de CO_2 . Para calcular el flujo de CO_2 en la superficie ($Z=0$) A1 usa una extrapolación lineal suponiendo que la producción de CO_2 es constante dentro del perfil de suelo, mientras que A2 usa la diferencia de concentraciones entre la atmósfera y la medición de concentración de CO_2 más cercana a la superficie. Para A2 se usó una constante de 380 ppm como concentración atmosférica para los sitios de Jre y Nme; en el caso de Hyy, se usó una medición de CO_2 atmosférico hecha por una cámara automática de CO_2 localizada a 15 cm sobre la superficie del suelo. Para el caso de A1 en Stu se consideró una tercera medición hecha por una torre micrometeorológica a 3 m de altura (Vargas et al., 2010; Vargas et al., 2011a), misma que fue usada para el cálculo de A2.

2.3 Estimación de errores aleatorios

Anteriormente se han propuesto diferentes metodologías para estimar los errores aleatorios (ϵ) (Menzer et al., 2013). Hollinger et al. (2004) utilizó mediciones simultaneas de torres micrometeorológicas utilizando la técnica de correlación turbulenta, separadas por 775 m en un bosque manejado, bajo la suposición que ambas torres micrometeorológicas se encontraban bajo las mismas condiciones ambientales y realizaban mediciones de flujos de CO₂ y energía similares. Después, Hollinger y Richardson (2005) propusieron el método de días pareados, donde intercambian espacio por tiempo, calculando ϵ utilizando mediciones de una sola torre micrometeorológica, comparando mediciones de días consecutivos que estuvieran bajo ciertas condiciones ambientales (e.g., rangos similares de temperatura, velocidad del viento, hora del día). Posteriormente, Richardson y Hollinger (2005) propusieron el método de residuales, donde determinaban ϵ por la diferencia entre mediciones realizadas por una torre micrometeorológica y modelos empíricos de respiración. Además, Schmidt et al. (2012) propusieron realizar mediciones simultaneas en la misma torre micrometeorológica.

El método de días pareados fue usado para inferir las propiedades estadísticas de ϵ de los flujos de CO₂ de suelo para cada sitio (Hollinger y Richardson, 2005; Richardson et al., 2006; Savage et al., 2008) :

$$\epsilon = \frac{F_{t=0} - F_{t=24}}{\sqrt{2}}, \quad (8)$$

donde $F_{t=0}$ es el flujo de CO₂ calculado en tiempo cero y $F_{t=24}$ es el flujo de CO₂ calculado exactamente 24 horas después. Para asegurar que las diferencias de las mediciones pareadas fueran atribuidas a ϵ y no a factores abióticos externos (e.g., precipitación), se estableció el límite de que el día después ($F_{t=24} \dots F_{t=47}$ del día d_{t+1}) tuviera condiciones similares de θ que el día anterior ($F_{t=0} \dots F_{t=23}$ del día d_t), usando el rango $\mu_{\theta,dt} - 2\sigma_{\theta,dt} < \mu_{\theta,dt+1} < \mu_{\theta,dt} + 2\sigma_{\theta,dt}$; donde $\mu_{\theta,dt}$ es el promedio y $\sigma_{\theta,dt}$ la desviación estándar de θ del día dt . Este método de días pareados se consideró adecuado para calcular ϵ en F debido a que el suelo es heterogéneo, desde micro escalas hasta

niveles ecosistémicos, lo que hace que sus propiedades físicas cambien espacialmente, afectando los flujos de CO₂ de suelo, y tratar de replicar el experimento propuesto por Hollinger y Richardson (2005), donde usaron dos mediciones con torres micrometeorológicas bajo el supuesto de que se encontraban bajo las mismas condiciones no sería adecuado.

2.4 Análisis de datos

Para determinar los intervalos de humedad (i.e., mésico, bajo, alto), se establecieron tres diferentes intervalos independientes de cada sitio: condiciones secas ($\theta_L < \mu_{\bar{\theta}} - 0.5\sigma_{\bar{\theta}}$); condiciones mésicas ($\mu_{\bar{\theta}} + 0.5\sigma_{\bar{\theta}} < \theta_N < \mu_{\bar{\theta}} - 0.5\sigma_{\bar{\theta}}$); condiciones húmedas ($\theta_H > \mu_{\bar{\theta}} + 0.5\sigma_{\bar{\theta}}$), donde $\mu_{\bar{\theta}}$ y $\sigma_{\bar{\theta}}$ representan el promedio y desviación estándar respectivamente de θ de cada sitio de estudio.

Debido a que ε es compuesto a través de dos mediciones en diferentes tiempos (ver Ecuación 8), para comparar ε con F y θ se utilizó un método de promedios pareados:

$$X_{\varepsilon} = \frac{X_{t=0} + X_{t=24}}{2} \quad (9)$$

donde X_{ε} es el promedio pareado de las mediciones (i.e., F_{ε} , θ_{ε}) que corresponden al compuesto de ε en Ecuación 8; $X_{t=0}$ es la medición a tiempo cero que corresponde a $F_{t=0}$ en Ecuación 8; y $X_{t=24}$ es la medición exactamente 24 horas después que corresponde a $F_{t=24}$ en Ecuación 8. De esta forma se podrá comparar diferentes mediciones con ε .

Estudios previos (Savage et al., 2008) encontraron que la distribución de ε se explica mejor por una distribución doble exponencial o distribución de Laplace, en comparación a una distribución normal o Gaussiana. La distribución doble exponencial con media cero está definida por:

$$f(x) = e^{-|x/\beta|}/2\beta. \quad (10)$$

La distribución doble exponencial tiene una desviación estándar definida por $\sigma = (\sqrt{2})\beta$. El parámetro no sesgado β es calculado por:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{N}. \quad (11)$$

La distribución doble exponencial está caracterizada por contar con un pronunciado pico central y colas largas, en comparación de una distribución Gaussiana. Además, mientras que la distribución Gaussiana abarca 68% de los datos dentro de $\pm 1\sigma$, la distribución doble exponencial abarca 76% de los datos (cf. $\pm 2\sigma$ abarca 95% de los datos de una distribución normal o Gaussiana, 94% para la distribución doble-exponencial) (Richardson et al., 2006).

Se establecieron diferencias significativas en F y ε usando intervalos de confianza al 95% calculados mediante el método de remuestreo aleatorio (*bootstrap*) con 1000 repeticiones, estableciendo que cuando hubiera intervalos de confianza que traslaparan no se considerarían diferencias significativas con un valor $\alpha=0.05$. Se utilizó estadística no paramétrica para evaluar si la distribución de los errores aleatorios seguían una distribución Gaussiana (prueba Kolmogorov-Smirnov). Además, se estimaron estadísticas básicas para los errores aleatorios: desviación estándar:

$$\sigma = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (12)$$

curtosis:

$$K = \frac{N-1}{(N-2)(N-3)} \left((N+1) \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} - 3(N-1) \right) + 3; \quad (13)$$

y sesgo:

$$S = \frac{\sqrt{N(N-1)}}{N-2} \left(\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right). \quad (14)$$

Todos los análisis se realizaron mediante rutinas en MATLAB (R2010b, Mathworks Inc., Natick, MA, EEUU).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Estimaciones de flujos de CO₂ de suelo (F)

Se calcularon promedios diarios de flujos de CO₂ de suelo (F) utilizando los métodos A1 y A2, además de calcular el valor para ENS (Figura 1). Ambos métodos y el ensamble tienen una representación similar temporal en todos los sitios. Las diferencias entre los métodos se presentan en especial cuando los flujos son altos (Figura 1). El promedio diario de θ muestra las diferencias entre los sitios de estudio (Figura 1).

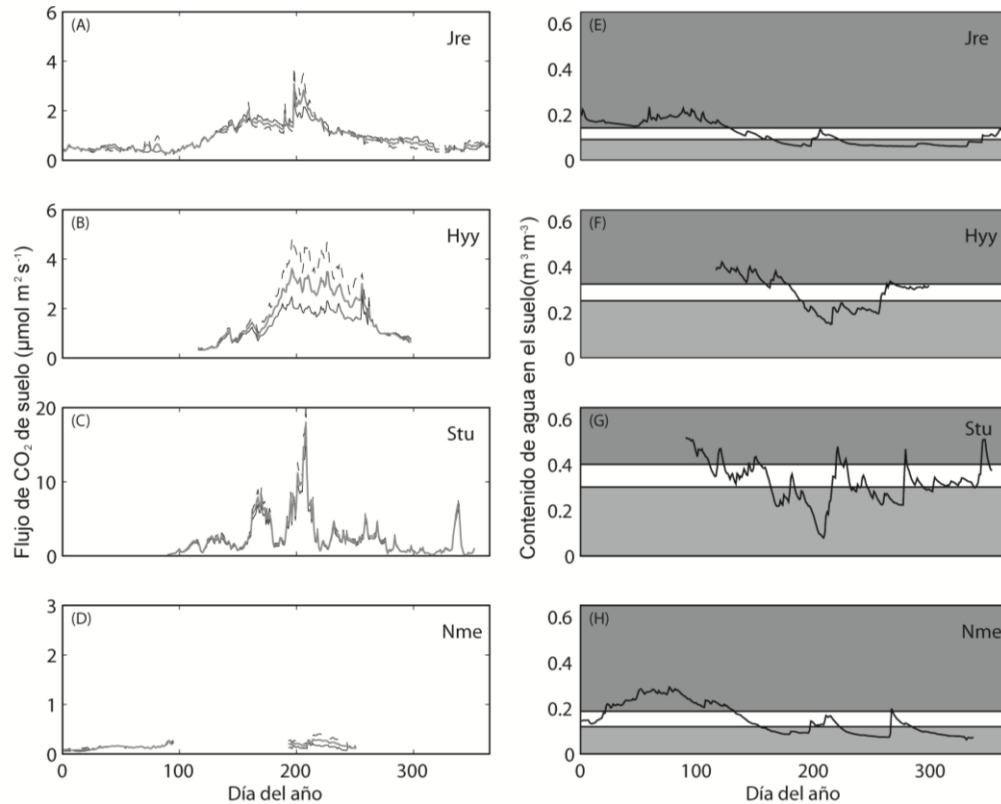


Figura 1. Promedios diarios de flujos de CO₂ de suelo (F) para los diferentes sitios de estudio (A, B, C, D), la línea continua negra representa los resultados de A1, la línea discontinua negra representa los resultados de A2, la línea gris representa los resultados de ENS. Promedios diarios de contenido de agua en el suelo (θ) para los diferentes sitios de estudio (E, F, G, H) y sus diferentes condiciones de humedad: gris oscuro representa condiciones húmedas (θ_H), blanco representa condiciones normales (θ_N), y gris claro representa condiciones secas (θ_L)

Para Jre el promedio diario de F para A1, A2 y ENS fueron (promedio \pm desviación estándar) 0.89 ± 0.49 , 0.87 ± 0.58 , y 0.88 ± 0.51 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente; y el promedio diario de θ fue 0.12 ± 0.05 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para Hyy el flujo promedio diario de F calculado para A1, A2 y ENS fue de 1.33 ± 0.57 , 2.11 ± 1.37 , y 1.72 ± 0.96 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente; y el promedio diario de θ fue de 0.28 ± 0.07 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$. En Stu el promedio diario de F para A1, A1 y ENS fueron 2.21 ± 2.34 , 2.82 ± 2.97 , y 2.51 ± 2.65 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ respectivamente; y el promedio diario de θ fue de 0.35 ± 0.10 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$. En Nme el promedio diario de F para A1, A2 y ENS fue de 0.13 ± 0.04 , 0.18 ± 0.08 , y 0.16 ± 0.05 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ respectivamente; mientras que el promedio diario de θ fue de 0.15 ± 0.07 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$. No se encontraron diferencias significativas utilizando intervalos de confianza al 95% entre A1, A2 y ENS en ningún sitio.

3.2 Distribución de los errores aleatorios (ϵ)

La distribución de los errores aleatorios (ϵ) usando el método de días pareados fue caracterizada por tener largas colas y un pico central, tal y como han sido descritos previamente para mediciones de flujos de CO_2 con técnicas ecosistémicas (Richardson et al., 2006) y para mediciones de F en un bosque templado (Savage et al., 2008) (Figura 2). Se probó si la distribución de ϵ seguía una distribución Gaussiana con una prueba Kolmogorov-Smirnov, indicando que no siguen este tipo de distribución ($P < 0.001$; Tabla 2) para ningún sitio o método (i.e., A1, A2, ENS). La elevada curtosis que presentan todas las distribuciones (>5) sugieren que ϵ sigue una distribución doble exponencial o de Laplace (Figura 2). En algunos casos la distribución es simétrica debido a que el sesgo de la distribución es cercano a cero, pero en otros casos existe un sesgo negativo (Tabla 2), haciendo las distribuciones asimétricas (Figura 2). El valor promedio de ϵ es cercano a cero (Tabla 2) para todos los sitios de estudio, y no existen

Tabla 2. Propiedades estadísticas de los errores aleatorios (ϵ) totales

Sitio	M	N	$\mu(\epsilon)$	IC (95%)	$\sigma(\epsilon)$	$(\sqrt{2})\beta$	S	K	KS
Jre	A1	5006	-0.0007	0.003, -0.0044	0.13	0.59	-0.21	13.09	<0.001
	A2		-0.0012	0.0061, -0.0085	0.26	0.62	-2.52	33.51	<0.001
	ENS		-0.0009	0.0033, -0.0052	0.15	0.59	-2.62	41.31	<0.001
Hyy	A1	3922	-0.0015	0.0027, -0.0057	0.14	0.72	-0.76	12.13	<0.001
	A2		-0.0004	0.0084, -0.0104	0.28	1.77	-2.84	28.64	<0.001
	ENS		-0.0009	0.0040, -0.0064	0.16	1.23	-3.87	41.64	<0.001
Stu	A1	6408	-0.0061	0.0161, -0.0207	0.73	2.31	1.94	33.21	<0.001
	A2		-0.0069	0.0185, -0.0233	0.95	2.94	1.71	31.12	<0.001
	ENS		-0.0065	0.0125, -0.0255	0.84	2.62	1.82	32.05	<0.001
Nme	A1	3981	-0.0004	0.0004, -0.0012	0.03	0.05	0.09	5.39	<0.001
	A2		-0.0022	-0.0006, -0.0038	0.05	0.11	0.53	5.83	<0.001
	ENS		-0.0017	-0.0006, -0.0028	0.03	0.07	0.33	5.46	<0.001

M=Método para calcular F ; N=Numero de observaciones para calcular ϵ ; μ =promedio; IC=Intervalos de confianza; σ =desviación estándar; $(\sqrt{2})\beta$ = desviación estándar de la distribución doble exponencial; S=Sesgo; K=Curtosis; KS=Probabilidad de que ϵ siga una distribución Gaussiana (prueba Kolmogorov-Smirnov).

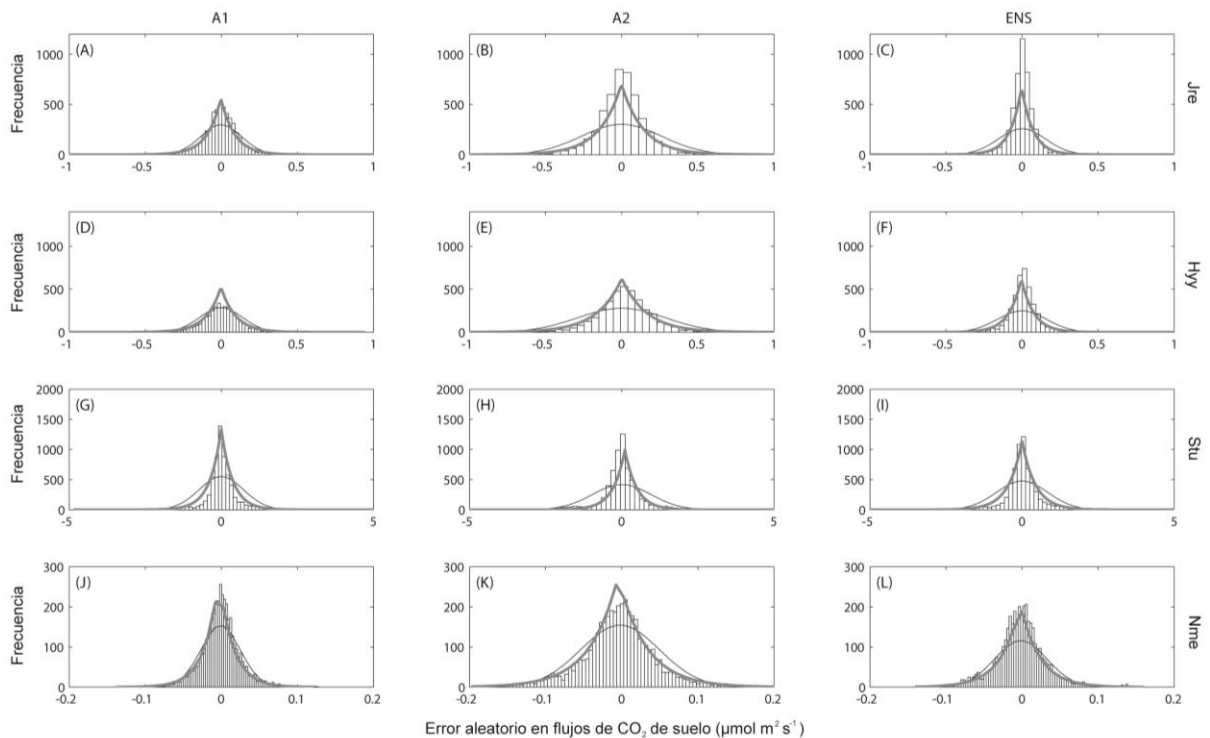


Figura 2. Distribución de frecuencias de los errores aleatorios totales calculados para A1, A2 y ENS para los cuatro sitios de estudio. La línea negra es una distribución Gaussiana y la línea gris es una distribución doble exponencial.

diferencias significativas entre métodos con respecto a ε con intervalos de confianza del 95%. Los valores de las desviaciones estándar (i.e., $\sigma(\varepsilon); (\sqrt{2})\beta$) tendieron a ser mayores para A2 que para A1 y ENS, lo que puede sugerir una mayor variación con respecto a ε para A2.

Cuando ε fue clasificado con respecto a los distintos rangos de θ (i.e., $\theta_L, \theta_N, \theta_H$), sus valores promedio continuaron siendo cercanos a cero, y no se encontraron diferencias estadísticamente significativas con intervalos de confianza al 95% para los sitios de Jre y Hyy, mientras que para Stu A1 y A2 mostraron diferencias en θ_H ; además, en Nme se encontraron diferencias en θ_L y θ_H (Tabla 3), apoyando la hipótesis 3. Existen también diferencias al momento de comparar las características de las distribuciones de ε cuando son divididos en distintos rangos de θ , especialmente para los sitios de Jre y Hyy. Por ejemplo, en Jre para el rango de θ_L el sesgo es mayor que para θ_N y θ_H ; para Hyy el sesgo es mayor para A2 que para A1. Por otro lado, se debe de resaltar que para Stu el sesgo es consistentemente mayor que cero, en contraste con Nme, que tiene valores de sesgos <1 .

3.3 Errores aleatorios (ε) y su relación con θ y F

Cuando ε fue clasificado de acuerdo a los diferentes rangos de θ se calculó la desviación estándar de los errores aleatorios (i.e., $\sigma(\varepsilon); (\sqrt{2})\beta$) de acuerdo a cada rango. Cuando fueron comparados los distintos valores de $\sigma(\varepsilon)$ contra los valores de θ no se encontró ninguna correlación significativa ($P>0.05$). Cuando se comparó $\sigma(\varepsilon)$ contra los valores de F divididos de acuerdo a los distintos rangos de θ tampoco se encontró correlación significativa ($P>0.05$). Se comparó $(\sqrt{2})\beta$ contra los valores de θ y no se encontró relación significativa alguna, al igual que al comparar F clasificado por las diferentes condiciones de θ . Se encontró una relación positiva de $(\sqrt{2})\beta$ con F (Figura 3; $P<0.05$), como ha sido sugerido anteriormente para flujos de CO_2 medidos con cámaras de respiración de suelo (Savage et al., 2008) y para técnicas usadas a nivel ecosistema (Richardson et al., 2006). Cuando se comparó ε con F_ε y θ_ε no se encontró relación significativa

($P > 0.05$). Sin embargo, al calcular la suma parcial acumulada de ε ($\varepsilon_{cs} = \langle \varepsilon_n \rangle = \sum_{i=1}^n \varepsilon$) y el promedio parcial de ε ($\varepsilon_P = \langle \varepsilon_n \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon$), donde ε_n es ε en tiempo n , y compararlas contra F_ε y θ_ε , se encontró una relación negativa con F_ε y ε_{cs} (Figura 4; $P < 0.05$) y de F_ε y ε_P (Figura 5; $P < 0.01$).

Tabla 3. Propiedades estadísticas de los errores aleatorios (ε) clasificados de acuerdo a los diferentes intervalos de contenido de agua en el suelo (θ)

Sitio	θ_R	M	N	$\mu(\varepsilon)$	IC (95%)	$\sigma(\varepsilon)$	$(\sqrt{2})\beta$	S	K	KS
Jre	θ_L	A1	2837	-0.0019	0.0027, -0.0065	0.13	0.13	-1.43	12.21	<0.01
		A2		-0.0125	-0.0032, -0.0219	0.26	0.19	-4.70	46.04	<0.01
		ENS		-0.0072	-0.0019, -0.0125	0.15	0.09	-6.71	68.76	<0.01
	θ_N	A1	666	0.0230	0.0389, 0.0071	0.21	0.19	0.96	7.62	<0.01
		A2		0.0611	0.0945, 0.0278	0.44	0.39	-0.25	8.32	<0.01
		ENS		0.0421	0.0619, 0.0222	0.26	0.24	0.88	5.70	<0.01
	θ_H	A1	1503	-0.0090	-0.0042, -0.0138	0.09	0.10	-1.12	10.20	<0.01
		A2		-0.0074	-0.0008, -0.0141	0.13	0.14	-0.21	3.89	<0.01
		ENS		-0.0082	-0.0041, -0.0122	0.08	0.23	-0.95	9.37	<0.01
Hyy	θ_L	A1	1457	0.0034	0.0081, -0.0013	0.13	0.16	-1.33	16.66	<0.01
		A2		0.0039	0.0131, -0.0052	0.26	0.29	-3.60	38.88	<0.01
		ENS		0.0037	0.0093, -0.0019	0.16	0.15	-4.85	54.95	<0.01
	θ_N	A1	1179	0.0002	0.0044, -0.0049	0.09	0.11	0.49	6.72	<0.01
		A2		-0.0013	0.0091, -0.0116	0.21	0.18	-1.45	28.95	<0.01
		ENS		0.0007	0.0041, -0.0056	0.10	0.08	-1.47	29.54	<0.01
	θ_H	A1	1286	-0.0081	-0.0033, -0.0130	0.11	0.13	0.09	7.56	<0.01
		A2		-0.0074	0.0016, -0.0165	0.21	0.19	-3.09	42.06	<0.01
		ENS		-0.0078	-0.0033, -0.0123	0.10	0.09	-2.35	27.71	<0.01
Stu	θ_L	A1	1994	0.0348	0.0718, -0.0023	1.01	0.89	1.51	19.21	<0.01
		A2		0.0454	0.0940, -0.0032	1.33	1.22	1.33	18.09	<0.01
		ENS		0.0401	0.0828, -0.0027	1.17	1.06	1.42	18.59	<0.01
	θ_N	A1	2586	-0.0190	0.0017, -0.0397	0.54	0.46	-1.04	16.68	<0.01
		A2		-0.0222	0.0035, -0.0479	0.67	0.61	-0.85	14.86	<0.01
		ENS		-0.0206	0.0026, -0.0438	0.61	0.54	-0.93	15.68	<0.01
	θ_H	A1	1828	-0.0535	-0.0468, -0.0603	0.15	0.21	-1.87	9.76	<0.01
		A2		-0.0695	-0.0607, -0.0783	0.19	0.28	-1.87	9.57	<0.01
		ENS		-0.0615	-0.0537, -0.0693	0.17	0.56	-1.87	9.65	<0.01

Nme	θ_L	A1	346	0.0029	0.0041, 0.0017	0.04	0.04	0.21	3.17	<0.01
		A2		0.0119	0.0140, 0.0097	0.06	0.05	0.24	3.06	<0.01
		ENS		0.0069	0.0084, 0.0055	0.04	0.03	0.24	2.84	<0.01
	θ_N	A1	1279	-0.0012	0.0003, -0.0026	0.03	0.02	0.02	5.16	<0.01
		A2		-0.0035	-0.0011, -0.0060	0.05	0.04	0.14	5.04	<0.01
		ENS		-0.0025	-0.0007, -0.0042	0.04	0.02	0.14	5.15	<0.01
	θ_H	A1	2432	-0.0005	0.0002, -0.0013	0.02	0.02	0.03	4.41	<0.01
		A2		-0.0035	-0.0016, -0.0053	0.05	0.02	0.76	7.10	<0.01
		ENS		-0.0025	-0.0013, -0.0037	0.03	0.02	0.42	6.41	<0.01

θ_R = Rango de humedad (i.e., $\theta_L, \theta_N, \theta_H$); M=Método para calcular F ; N=Numero de observaciones para calcular ε ; μ =promedio; IC=Intervalos de confianza; σ =desviación estándar; $(\sqrt{2})\beta$ = desviación estándar de la distribución doble exponencial; S=Sesgo; K=Curtosis; KS=Probabilidad de que ε siga una distribución Gaussiana (prueba Kolmogorov-Smirnov).

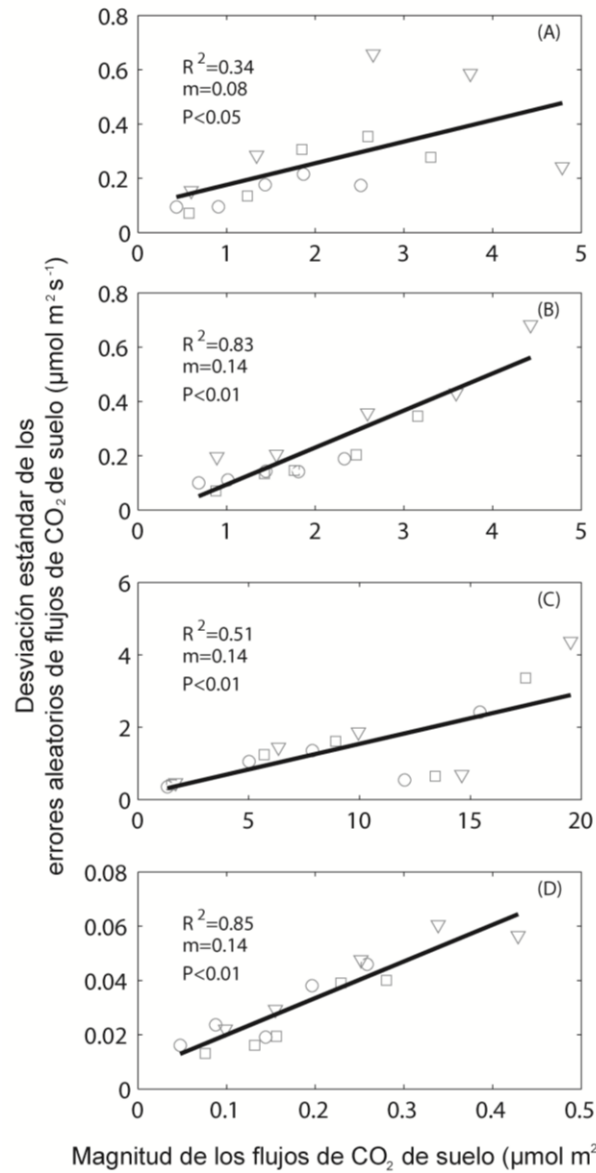


Figura 3. Relación entre la desviación estándar ($(\sqrt{2})\beta$) de los errores aleatorios (ϵ) y los flujos de CO₂ de suelo (F) para los sitios de estudio (Jre=A; Hyy=B; Stu=C; Nme=D). Las figuras representan los diferentes métodos para calcular F : A1 = ●; A2 = ▼; ENS = ■.

3.4 Errores aleatorios (ϵ) y su contribución total a los flujos de CO₂ de suelo

El sitio de estudio que tuvo la mayor suma anual de flujos de CO₂ de suelo (F_T) fue Stu (pastizal), seguido por Jre (bosque templado), Hyy (bosque boreal), y

Nme (semiárido) (Tabla 4). El sitio de estudio y método (i.e., A1, A2) que tuvo la mayor contribución (%) de errores aleatorios (ϵ) hacia F_T fue Nme usando A2, mientras que el sitio de estudio y método al que ϵ tuvo una menor contribución a F_T fue A2 en Hyy (Tabla 4). En Jre la contribución de ϵ hacia F_T calculado con los distintos métodos (i.e., A1, A2) fue similar, con un rango de entre ≈ -2 a ≈ -3.5 %. En Hyy, la contribución de ϵ hacia F_T presentó una mayor contribución de A1 que de A2. Para Stu la contribución de ϵ hacia F_T fue similar entre los métodos (≈ -6 a ≈ -7 %). En Nme se encontró una sustancial diferencia entre la contribución de ϵ hacia F_T siendo mayor para A2 que para A1. Aun así, no se encontraron diferencias significativas entre ϵ calculado para los distintos métodos.

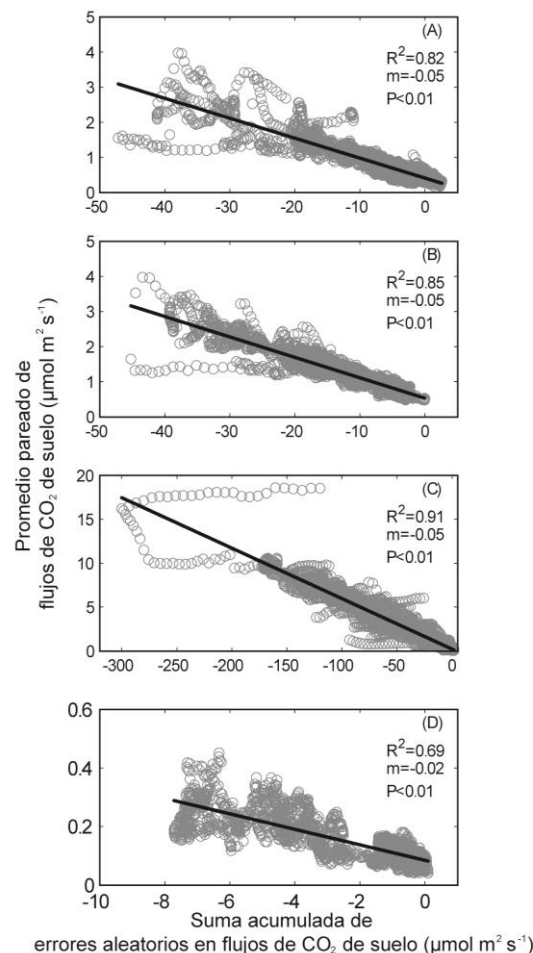


Figura 4. Relación de la suma acumulada de los errores aleatorios (ϵ_{cs}) contra el promedio pareado de los flujos de CO₂ de suelo (F_e). La línea negra representa la regresión lineal ponderada (cuadrática) para evitar la influencia de valores extremos. Jre=A; Hyy=B; Stu=C; Nme=D.

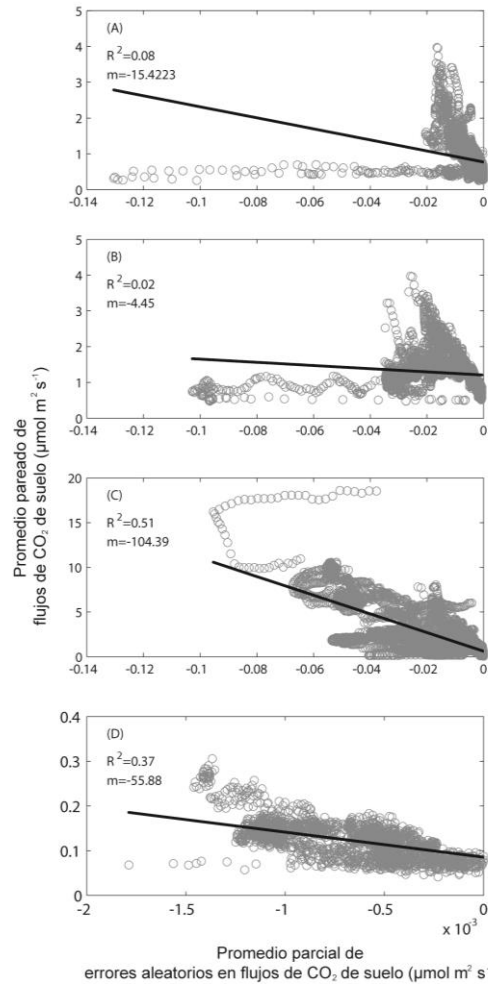


Figura 5. Relación del promedio parcial de los errores aleatorios (ϵ_p) contra el promedio pareado de los flujos de CO₂ de suelo (F_ϵ). La línea negra representa la regresión lineal ponderada (cuadrática) para evitar la influencia de valores extremos. Jre=A; Hyy=B; Stu=C; Nme=D.

Tabla 4. Contribución de los errores aleatorios (ϵ) a la suma total y a la suma total de la desviación estándar (σ) de los flujos de CO₂ de suelo (F)

Sitio	M	Suma total de F (g C m ² a ⁻¹)	Suma total de σ para F (g C m ² a ⁻¹)	Suma total de ϵ para F (g C m ² a ⁻¹)	Porcentaje de contribución de ϵ total para F total (%)	Porcentaje de contribución de ϵ total para σ total (%)
Jre	A1	324.85	178.85	-6.13	-1.88	-3.42
	A2	317.55	211.7	-10.51	-3.31	-4.96
	ENS	321.20	54.75	-7.88	-2.45	-14.4
Hyy	A1	485.45	208.05	-13.14	-2.71	-6.31
	A2	770.15	500.05	-3.51	-0.45	-0.70
	ENS	627.80	350.40	-7.88	-1.25	-2.25
Stu	A1	806.65	854.10	-53.44	-6.62	-6.25
	A2	1029.3	1084.05	-60.44	-5.87	-5.58
	ENS	916.15	967.25	-56.94	-6.21	-8.88
Nme	A1	47.45	14.6	-3.51	-7.38	-24.00
	A2	67.7	29.20	-19.27	-29.33	-66.00
	ENS	54.75	18.25	-14.89	-27.2	-89.6

M: Método utilizado para calcular F .

Capítulo 4. Discusión

4.1 Discusión

Los resultados mostrados soportan la hipótesis 1 debido a que no se encontraron diferencias significativas en los promedios diarios de los flujos de CO₂ de suelo (F) entre los distintos métodos (i.e., A1, A2), teniendo también una representación similar temporal. Los errores aleatorios totales (ε) calculados para los métodos para calcular F no presentaron diferencias estadísticamente significativas, soportando la hipótesis 2. Finalmente, se encontraron diferencias significativas para ε cuando fue clasificado de acuerdo a los distintos rangos de contenido de agua en el suelo (θ) para los sitios de Stu y Nme en los rangos de θ_H y θ_L y θ_H , respectivamente, apoyando a la hipótesis 3. A continuación se discuten las implicaciones de los resultados obtenidos.

Los métodos para calcular F (e.g., A1, A2) podrán no tener una perfecta relación 1:1, pero aun así los patrones temporales y promedios diarios fueron similares (apoyando la hipótesis 1). Esto es esperado debido a que ambos métodos para calcular F tienen una representación similar del fenómeno físico de la difusión del CO₂ en el suelo, además de contar con parámetros de entrada similares (e.g., concentraciones de CO₂, contenido de agua en el suelo, temperatura de suelo, propiedades físicas del suelo). Sin embargo, las diferencias en cuanto a la magnitud de F entre A1 y A2 son consistentes al momento de presentarse flujos altos (Figura 1). Los resultados muestran que los métodos para calcular F son robustos al momento de no presentar diferencias significativas a través de distintos ecosistemas. Aun así, se necesitan más pruebas en diferentes tipos de vegetación y eventos climáticos, en especial cuando se esperan flujos altos (e.g., humedecimiento y derretimiento (Kim et al., 2012)).

El incremento en la aplicación de sistemas automatizados está resultando en crecientes bases de datos de mediciones quasi-continuas (e.g., promedios de 30 min a 1 hora), ofreciendo la oportunidad de evaluar las incertidumbres en las

mediciones. Se ha prestado mucha atención específicamente a mediciones realizadas por la técnica de correlación turbulenta o *eddy covariance* (Dragoni et al., 2007; Goulden et al., 1996; Hagen et al., 2006; He et al., 2010; Hollinger y Richardson, 2005; Liu et al., 2009; Papale et al., 2006; Richardson y Hollinger, 2005; Richardson et al., 2006; Richardson et al., 2008; Schmidt et al., 2012). En contraste, se ha prestado menos atención para identificar las incertidumbres en mediciones de F (Gomez-Casanovas et al., 2012; Phillips et al., 2010; Savage et al., 2008). Recientemente, ha habido un interés creciente por la evaluación de las incertidumbres a través de redes de monitoreo (He et al., 2010; Schmidt et al., 2012), haciendo que esos esfuerzos se expandan a otras redes de monitoreo nacionales y regionales.

Los resultados demuestran que ϵ sigue patrones similares a pesar del método para calcular F y tipo de vegetación donde se realizaron las mediciones (apoyando la hipótesis 2). El valor promedio de ϵ total a través de los diferentes sitios de estudio e independientemente del método para calcular F fue congruentemente cercano a cero. Su distribución no es Gaussiana y se explica mejor por una distribución doble exponencial (i.e., colas largas y prominente pico central; Figura 2, Tabla 2), tal y como ha sido reportado para mediciones de técnicas ecosistémicas (Richardson et al., 2006). Sin embargo, existen diferencias en cuanto a las propiedades de las distribuciones entre los métodos (Tabla 2). La desviación estándar de ϵ (i.e., $\sigma(\epsilon), (\sqrt{2})\beta$) fue consistentemente mayor para A2 que para A1, lo que sugiere una variación mayor de ϵ en A2. Además, los valores de sesgo para A1 fueron generalmente más bajos que para A2, y los valores más altos de curtosis fueron constantemente más altos para A2 que para A1. Las diferencias en las propiedades de las distribuciones de ϵ pueden implicar la presencia de errores sistemáticos para A2 no identificados en el presente estudio, posiblemente debido a su modo de representar el fenómeno físico.

La distribución doble exponencial de ϵ para ambos métodos sugiere que se presentan valores altos de ϵ más frecuentemente que en una distribución Gaussiana y que los valores bajos de ϵ son mucho más frecuentes que valores

altos de ε , y esos valores bajos de ε son más comunes que en una distribución Gaussiana (Figura 2). Se sugiere que los valores altos de ε pueden ser explicados debido al método para calcular ε . El método de días pareados para calcular ε utiliza dos mediciones realizadas con una diferencia de 24 horas, bajo la suposición que fueron realizadas bajo las mismas condiciones ambientales. Bajo esta suposición, este método no toma en cuenta desfases temporales que pueden influenciar la magnitud del flujo.

Los resultados muestran que ε presenta diferencias estadísticamente significativas entre los distintos rangos de θ , apoyando la hipótesis 3. Las diferencias encontradas en Stu y Nme apoyan la hipótesis de que las diferencias en ε se encontrarían en los rangos de θ_L y θ_H , posiblemente debido a la sensibilidad de los modelos de difusión (e.g., Ecuaciones 2 y 3) ante diferentes condiciones de humedad (Risk et al., 2008). Cuando ε fue clasificado de acuerdo a los diferentes intervalos de θ (i.e., θ_L , θ_N , θ_H) su valor promedio continuo siendo cercano a cero (Tabla 3), su distribución fue mejor representada por una distribución doble exponencial, y se encontraron consistentemente valores más altos de desviación estándar (i.e., $\sigma(\varepsilon)$, $(\sqrt{2})\beta$) para $A2$ que para $A1$. Estos resultados son congruentes con los presentados anteriormente para ε en la literatura (Savage et al., 2008), aunado a que también se encontraron diferencias en las propiedades de las distribuciones de los valores totales de ε . Estas diferencias en las propiedades de la distribución de ε a través de las distintas condiciones de θ sugieren que ε puede tener una mayor contribución hacia el cálculo de F en determinadas condiciones ambientales, tal y como se ha demostrado al encontrar diferencias significativas en distintos intervalos de θ en Stu y Nme .

Los resultados muestran una relación significativa ($P < 0.05$) entre la desviación estándar de ε ($(\sqrt{2})\beta$) y F (Figura 3), y no se encontró una relación significativa entre θ y ε en diferentes escalas temporales (e.g., diaria, estacional, anual) o condiciones ambientales (e.g., θ_L , θ_N , θ_H). Cuando $(\sqrt{2})\beta$ y F fueron relacionados a través de los sitios de estudio, se encontró que $(\sqrt{2})\beta$ se incrementa

de acuerdo a la magnitud de F (Figura 3). Estos resultados apoyan los resultados previos de ϵ con respecto a F (Savage et al., 2008), así como para flujos ecosistémicos de CO_2 utilizando la técnica de correlación turbulenta (Richardson et al., 2006). Estos resultados demuestran que ϵ no tiene una varianza constante y no sigue una distribución Gaussiana, implicando que, al momento de utilizar métodos de interpolación (e.g., mínimos cuadrados), los parámetros para su cálculo deben de ser estimados con métodos más robustos (e.g., Monte Carlo, Estimadores de Máxima Verosimilitud; Richardson y Hollinger, 2005). Además, se encontró que ϵ es acumulativo con relación al incremento de F (Figura 4), demostrando que los valores altos de ϵ se presentan en los valores altos de F . Estos resultados implican la necesidad de una evaluación de incertidumbres de diferentes flujos ecosistémicos a través de diferentes condiciones ambientales, así como eventos climáticos extremos y disturbios antropogénicos para cuantificar detalladamente la contribución de ϵ en las sumas anuales de flujos ecosistémicos, en especial de carbono.

La contribución de ϵ a la suma total de F (F_{Tot}) varía entre -1 y -20 % (promedio de -2.91 %), sugiriendo una sobrestimación potencial de F_{Tot} cuando ϵ no es tomado en cuenta. Los resultados obtenidos para F_{Tot} en los sitios de estudio son congruentes con los reportados en la literatura (Bahn et al., 2010; Bond-Lamberty y Thompson, 2010). Para los sitios de Hyy, Stu y Nme, donde las series de tiempo fueron más cortas debido a fallas en los sensores, la contribución de ϵ a F_{Tot} podría disminuir, ya que ha sido reportado anteriormente que entre más corta sea la serie de tiempo analizada mayor será la contribución de ϵ (Liu et al., 2009). Además, se ha reportado que el método de días pareados tiende a sobreestimar ϵ (Richardson et al., 2006), por lo que desarrollar diferentes metodologías para caracterizar las incertidumbres y los errores aleatorios en F es una necesidad.

Finalmente, como ejemplo, si extrapolamos la contribución promedio de ϵ (-7.89 %) a la estimación global para 2008 de 98 ± 12 Pg C (Bond-Lamberty y Thomson, 2010), entonces la contribución de ϵ sería de -8.05 Pg C. Este simple ejercicio es un ejemplo hacia una cuantificación de ϵ como incertidumbre de F a

escala global, pero se reconoce que un análisis detallado de ε debe realizarse a nivel de sitios individuales y escalar a nivel global.

Conclusiones

Se presentaron resultados de dos distintos métodos para calcular flujos de CO₂ de suelo (F) en cuatro diferentes sitios alrededor del mundo, en ecosistemas contrastantes. Los resultados obtenidos de los métodos se utilizaron para calcular los errores aleatorios (ϵ) asociados a sus estimaciones. La distribución que sigue ϵ es mejor explicada por una distribución doble exponencial, la cual es caracterizada por tener largas colas y un prominente pico central. La variación de ϵ incrementa de acuerdo con la magnitud de F y ϵ tiende a ser acumulativo.

Los métodos para calcular F demostraron ser robustos porque, a pesar de no tener una perfecta relación 1:1, tienen una representación similar temporal y no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los promedios diarios. Sin embargo, se necesitan comprender todos los procesos físicos y naturales dentro del suelo y cómo estos métodos pueden incorporarlos. Además, evaluar diferentes métodos para calcular F en sistemas productivos (e.g., agricultura) y diferentes eventos climáticos (e.g., huracanes, incendios) es necesario para comprender los procesos físicos y biológicos asociados a F .

Las principales implicaciones de los resultados son: a) conociendo las propiedades de ϵ ayudará a calcular intervalos de confianza para inventarios globales de carbono; y b) se podrá incorporar información sobre incertidumbres en estimaciones utilizando herramientas de asimilación de datos y fusión de modelos-datos.

Referencias bibliográficas

Anderson-Teixeira, K., Delog, J.P., Fox, A.M., Brese, D.A., Litvak, M., 2011, Differential responses of production and respiration to temperature and moisture drive the carbon balance across a climatic gradient in new mexico.: *Global Change Biology*, 17, 410-424.

Bahn, M., Knapp, M., Garajova, Z., Pfahringer, N., Cernusca, A., 2006, Root respiration in temperate mountain grasslands differing in land use: *Global Change Biology*, 12(6), 995-1006.

Bahn, M., Reichstein, M., Davidson, E.A., Grunzweig, J., Jung, M., Carbone, M.S., Epron, D., Misson, L., Nouvellon, Y., Rouspard, O., Savage, K., Trumbore, S.E., Gimeno, C., Yuste, J.C., Tang, J., Vargas, R., Janssens, I.A., 2010, Soil respiration at mean annual temperature predicts annual total across vegetation types and biomes: *Biogeosciences*, 7(7), 2147-2157.

Baldocchi, D.D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D.Y., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K.J., Evans, R.S., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G.G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T.P., Munger, J.W., Oechel, W., Paw U, K.T., Pilegaard, K., Schmid, H., Valentini, R., Verma, S.B., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., 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(11), 2416-2434.

Bond-Lamberty, B., Thomson, A., 2010, Temperature-associated increases in the global soil respiration record: *Nature*, 464(7288), 579-582.

Bond-Lamberty, B., Wang, C., Gower, S.T., 2004, A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration?: *Global Change Biology*, 10(10), 1756-1766.

Buchmann, N., 2000, Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in picea abies stands: *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 1625-1635.

Chapin, S.F., McFarland, J., McGuire, D.A., Euskirchen, E.S., Ruess, R.W., Kielland, K., 2009, The changing global carbon cycle: Linking plant-soil carbon dynamics to global consequences: *Journal of Ecology*, 97(5), 840-850.

Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A., Totterdell, I.J., 2000, Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model: *Letters to Nature*, 408(November), 184-187.

Cueva Rodriguez, A., Yopez, E.A., Garatuza Payan, J., Watts, C.J., Rodriguez, J.C., 2012, Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas: *Terra Latinoamericana*, 30(4), 327-336.

Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006, Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change: *Nature*, 440(7081), 165-173.

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

Dragoni, D., Schmid, H.P., Grimmond, C.S.B., Loescher, H.W., 2007, Uncertainty of annual net ecosystem productivity estimated using eddy covariance flux measurements: *Journal of Geophysical Research*, 112(D17102). Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JD008149/abstract>

Glinski, J., Stepniowski, W., 1985, *Soil aeration and its role for plants*: Boca Raton, FL, CRC Press.

Gomez-Casanovas, N., Anderson-Teixeira, K., Zeri, M., Bernacchi, C.J., Delucia, E.H., 2012, Gap filling strategies and error in estimating annual soil respiration: *Global Change Biology*, 19(6), 1941-1952.

Goulden, M.L., Munger, J.W., Fan, S.-M., Daube, B.C., Wofsy, S.C., 1996, Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and critical evaluation of accuracy: *Global Change Biology*, 2, 169-182.

Hagen, S.C., Braswell, B.H., Linder, E., Frolking, S., Richardson, A.D., Hollinger, D.Y., 2006, Statistical uncertainty of eddy flux-based estimates of gross ecosystem carbon exchange at Howland Forest, Maine: *Journal of Geophysical Research*, 111(D08S03). Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JD006154/abstract>

He, H., Liu, M., Sun, X., Zhang, L., Luo, Y., Wang, H., Han, S., Zhao, X., Shi, P., Wang, Y., Ouyang, Z., Yu, G., 2010, Uncertainty analysis of eddy flux measurements in typical ecosystems of Chinaflux: *ecological Informatics*, 5, 492-502.

Heimann, M., Reichstein, M., 2008, Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks: *Nature*, 451(7176), 289-292.

Hollinger, D.Y., Aber, J., Dail, B., Davidson, E.A., Goltz, S.M., Hughes, H., Leclerc, M.Y., Lee, J.T., Richardson, A.D., Rodrigues, C., Scott, N.A., Achuatavarier, D., Walsh, J., 2004, Spatial and temporal variability in forest-atmosphere CO₂ exchange: *Global Change Biology*, 10(10), 1689-1706.

Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., 2005, Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models: *Tree Physiology*, 25, 873-885.

House, J.I., Huntingford, C., Knorr, W., Cornell, S.E., Cox, P.M., Harris, G.R., Jones, C.D., Lowe, J.A., Prentice, I.C., 2008, What do recent advances in quantifying climate and carbon cycle uncertainties mean for climate policy?: *Environmental Research Letters*, 3(4), 044002. Recuperado de: <http://iopscience.iop.org/1748-9326/3/4/044002>

IPCC, 2007, Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo i, ii y iii al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. en R. K. Pachauri, A. Reisingers (eds.). Ginebra, Suiza p. 104.

Kampe, T.U., Johnson, B.R., Kuester, M., Keller, M., 2010, Neon: The first continental-scale ecological observatory with airborne remote sensing of vegetation canopy biochemistry and structure: *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1). Recuperado de: <http://remotesensing.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=707925>

Kim, D.G., Vargas, R., Bond-Lamberty, B., Turetsky, M.R., 2012, Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: A review of current literature and suggestions for future research: *Biogeosciences*, 9(7), 2459-2483.

Knapp, A.K., Beier, C., Briske, D., Classen, A.T., Luo, Y., Reichstein, M., Smith, M.D., Smith, S.D., Bell, J.E., Fay, P.A., Heisler, J.L., Leavitt, S.W., Sherry, R., Smith, B., Weng, E., 2008, Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems: *BioScience*, 58(9), 811-821.

Kuzyakov, Y., 2002, Factors affecting rhizosphere priming effects: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165, 382-396.

Liu, M., He, H., Yu, G., Luo, Y., Sun, X., Wang, H., 2009, Uncertainty analysis of CO₂ flux components in subtropical evergreen coniferous plantation: *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(2), 257-268.

McCulley, R.L., Boutton, T.W., Archer, S.R., 2007, Soil respiration in a subtropical savanna parkland: Response to water additions: *Soil Science Society of America Journal*, 71(3), 820-828.

Menzer, O., Moffat, A.M., Meiring, W., Lasslop, G., Schukat-Talamazzini, E.G., Reichstein, M., 2013, Random errors in carbon and water vapor fluxes assessed with gaussian processes: *Agricultural and Forest Meteorology*, 178-179, 161-172.

Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., Yakir, D., 2006, Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation: *Biogeosciences*, 3, 571-583.

Phillips, S.C., Varner, R.K., Froking, S., Munger, J.W., Bubier, J.L., Wofsy, S.C., Crill, P.M., 2010, Interannual, seasonal, and diel variation in soil respiration relative to ecosystem respiration at a wetland to upland slope at harvard forest: *Journal of Geophysical Research*, 115(G02019). Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JG000858/abstract>

Pumpanen, J., Ilvesniemi, H., Hari, P., 2003, A process-based model for predicting soil carbon dioxide efflux and concentration: *Soil Science Society of America Journal*, 67, 402-413.

Pumpanen, J., Ilvesniemi, H., Kulmala, L., Siivola, E., Laakso, H., Kolari, P., Helenelund, C., Laakso, M., Uusimaa, M., Hari, P., 2008, Respiration in boreal forest soil as determined from carbon dioxide concentration profile: *Soil Science Society of America Journal*, 72(5), 1187-1196.

Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J.C., Grünzweig, J.M., Reth, S., Subke, J.-A., Savage, K., Kutsch, W., Østreg, G., Ziegler, W., Anthoni, P., Lindroth, A., Hari, P., 2004, Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux: *Agricultural and Forest Meteorology*, 123(3-4), 159-176.

Raupach, M.R., Rayner, P.J., Barrett, D.J., DeFries, R.S., Heimann, M., Ojima, D.S., Quegan, S., Schimmlus, C.C., 2005, Model-data synthesis in terrestrial carbon observation: Methods, data requirements and data uncertainty specifications: *Global Change Biology*, 11(3), 378-397.

Reichstein, M., Beer, C., 2008, Soil respiration across scales: The importance of a model–data integration framework for data interpretation: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(3), 344-354.

Richardson, A.D., Hollinger, D.Y., 2005, Statistical modeling of ecosystem respiration using eddy covariance data: Maximum likelihood parameter estimation, and Monte Carlo simulation of model and parameter uncertainty, applied to three simple models: *Agricultural and Forest Meteorology*, 131(3-4), 191-208.

Richardson, A.D., Hollinger, D.Y., Burba, G.G., Davis, K.J., Flanagan, L.B., Katul, G.G., William Munger, J., Ricciuto, D.M., Stoy, P.C., Suyker, A.E., Verma, S.B., Wofsy, S.C., 2006, A multi-site analysis of random error in tower-based measurements of carbon and energy fluxes: *Agricultural and Forest Meteorology*, 136, 1-18.

Richardson, A.D., Mahecha, M.D., Falge, E., Kattge, J., Moffat, A.M., Papale, D., Reichstein, M., Stauch, V.J., Braswell, B.H., Churkina, G., Kruijt, B., Hollinger, D.Y., 2008, Statistical properties of random co₂ flux measurement uncertainty inferred from model residuals: *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(1), 38-50.

Risk, D., Kellman, L., Beltrami, H., 2008, A new method for in situ soil gas diffusivity measurement and application in the monitoring of subsurface CO₂ production: *Journal of Geophysical Research*, 113(G02018). Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JG000445/abstract>

Ryan, M.G., Law, B.E., 2005, Interpreting, measuring, and modeling soil respiration: *Biogeochemistry*, 73(1), 3-27.

Savage, K., Davidson, E.A., Richardson, A.D., 2008, A conceptual and practical approach to data quality and analysis procedures for high-frequency soil respiration measurements: *Functional Ecology*, 22, 1000-1007.

Schmidt, A., Hanson, C., Chan, W.S., Law, B.E., 2012, Empirical assessment of uncertainties of meteorological parameters and turbulent fluxes in the Ameriflux network: *Journal of Geophysical Research*, 117(G0414). Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2012JG002100/full>

Šimůnek, J., Suarez, D.L., 1993, Modelling of carbon dioxide transport and production in soil 1. Model development: *Water Resources Research*, 29(2), 487-497.

Skopp, J., Jawson, D., Doran, J.W., 1990, Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content: *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1619-1625.

Tang, J., Baldocchi, D.D., Qi, Y., Xu, L., 2003, Assessing soil CO₂ efflux using continuous measurements of CO₂ profiles in soils with small solid-state sensors: *Agricultural and Forest Meteorology*, 118(3-4), 207-220.

Vargas, R., Allen, M.F., 2008, Dynamics of fine root, fungal rhizomorphs, and soil respiration in a mixed temperate forest: Integrating sensors and observations: *Vadose Zone Journal*, 7(3), 1055-1064.

Vargas, R., Baldocchi, D.D., Allen, M.F., Bahn, M., Black, A.T., Collins, S.L., Curiel Yuste, J., Hirano, T., Jassal, R.S., Pumpanen, J., Tang, J., 2010, Looking deeper into the soil: Biophysical controls and seasonal lags of soil CO₂ production and efflux: *Ecological Applications*, 20(6), 1569-1582.

Vargas, R., Baldocchi, D.D., Bahn, M., Hanson, P.J., Hosman, K.P., Kulmala, L., Pumpanen, J., Yang, B., 2011, On the multi-temporal correlation between photosynthesis and soil CO₂ efflux: Reconciling lags and observations: *New Phytologist*, 191(4), 1006-1017.

Vargas, R., Carbone, M.S., Reichstein, M., Baldocchi, D.D., 2011, Frontiers and challenges in soil respiration research: From measurements to model-data integration: *Biogeochemistry*, 102, 1-13.

Vargas, R., Collins, S.L., Thomey, M.L., Johnson, J.E., Brown, R.F., Natvig, D.O., Friggens, M.T., 2012, Precipitation variability and fire influence the temporal dynamics of soil CO₂ efflux in an arid grassland: *Global Change Biology*, 18(4), 1401-1411.