

# SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO EN DIFERENTES ECOSISTEMAS ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN VENEZUELA

SIMULATION OF RESPONSES IN SOIL ORGANIC MATTER UNDER DIFFERENT ECOSYSTEMS IN TERMS OF CLIMATIC GRADIENTS IN VENEZUELA

MARIA ALEJANDRA RUJANO<sup>1</sup>,  
MAGDIEL ABLAN<sup>1</sup> y  
LINA SARMIENTO<sup>2</sup>

RECIBIDO: 27-03-11  
ACEPTADO 12-09-11

<sup>1</sup> Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, CESIMO, Mérida, Venezuela.  
<sup>2</sup> Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, ICAE, Mérida, Venezuela.

## RESUMEN

Utilizando los resultados de un experimento de descomposición de paja de trigo marcada con <sup>14</sup>C en un gradiente altitudinal, se validó un modelo sobre la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOMOS-6). Este experimento, realizado entre el periodo 1994-1997 en el marco de un proyecto de cooperación Venezuela-Francia, consistió en descomponer el material marcado en bolsitas con suelo enterradas a 5 cm, realizando muestreos periódicos para determinar el <sup>14</sup>C total y el <sup>14</sup>C de la biomasa microbiana (BM). MOMOS-6 simula la dinámica de descomposición de un sustrato en función de su calidad, considerando cinco compartimientos: necromasa lábil (NL), necromasa estable (NS), humus lábil (HL), humus estable (HS) y la BM. Para calibrar MOMOS-6 se utilizaron datos climáticos de los seis sitios estudiados (El Vigía, 65 m; Barinas, 165 m; Tovar, 780 m; Santa Rosa, 1800 m; Gavidia, 3400 m y El Banco, 3968 m), con los cuales se calculó un factor combinado de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo que actúa sobre todas las tasas del modelo para considerar el efecto climático sobre la dinámica de la descomposición. Los resultados muestran que el modelo MOMOS predijo en el escenario pesimista (centrado en el año 2060) el secuestro de carbono en una amplia gama de condiciones tropicales.

**Palabras clave:** descomposición, biomasa microbiana, temperatura y humedad.

## SUMMARY

Using data obtained in an experiment on decomposition of <sup>14</sup>C-marked wheat straw in a series of altitudinal gradient, we have validated a model, MOMOS-6, which reveals the dynamics of soil organic matter. MOMOS-6 simulates the dynamics of substrate decomposition in function with the material's five distinct qualities, namely, labile dead organic mass (NL), stable dead organic mass (NS), labile humus (HL), stable humus (HS), and microbial biomass (BM). The experiment, conducted between 1994 and 1997 under a collaboration project between Venezuela and France, consisted of placing the <sup>14</sup>C marked material in bags at 5 cm soil depth and taking periodic samples to determine the total <sup>14</sup>C and <sup>14</sup>C in microbial biomass in each sample. To calibrate MOMOS-6, we used climatic data in 6 locations at distinct sea levels; El Vigía 65 m, Barinas 165 m, Tovar 780 m, Santa Rosa 1800 m, Gavidia 3400 and El Blanco 3968 m. For considering climatic effects on decomposition dynamics, at each location we calculated combined response factors of soil temperature and humidity that presumably act on all rates of the model. Results showed that the model predicted the least expected estimates, predicted for the year 2060, of carbon capture in wide ranging tropical conditions.

**Key words:** decomposition, microbial biomass, temperature and moisture.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la actividad humana conlleva la liberación a la atmósfera de diversos gases que modifican su composición química, lo que está produciendo un cambio climático de forma acelerada. Se trata de un fenómeno desigual que conduce a un aumento de la temperatura en los polos y en las regiones continentales, denominado calentamiento global. Se predice, a partir de proyecciones basadas en simulaciones computacionales, un mayor calentamiento en el futuro. Las simulaciones parecen indicar que la principal causa de este cambio climático global es el aumento de las emisiones de dióxido de carbono y otros gases que aumentan el calor de la superficie y de la parte baja de la atmósfera, al aumentar el llamado efecto invernadero, ocasionando que se evapore más agua de los océanos (Martón, 2008).

Con el aumento de la temperatura, se afecta en gran medida el almacenamiento de carbono en el suelo y en la vegetación, ya que se acelera la mineralización, los nutrientes son liberados más rápidamente y la acumulación de la Materia Orgánica del Suelo (MOS) se reduce. Esta materia orgánica está ampliamente reconocida como reservorio de nutrientes para las plantas y el mayor factor de estabilización de la estructura edáfica. Es el componente clave del suelo que afecta sus propiedades químicas, físicas y biológicas, constituyendo un prerrequisito para la obtención de cultivos con niveles de producción elevados y estables (Andriulo, 2006).

Una de las funciones más importantes de la MOS es actuar como reservorio de carbono, representando más del doble del carbono contenido en la atmósfera, siendo sólo superado por los reservorios geológicos y por el carbono disuelto en las aguas oceánicas (Woomer y Swift, 1994). Los cambios que experimente esta materia orgánica pueden tener un impacto en el equilibrio global, existiendo dos factores

antrópicos importantes que están alterando la tasa natural de intercambio de carbono entre la atmósfera y la biosfera terrestre en sus procesos de fotosíntesis, respiración, descomposición y combustión: el cambio de uso de la tierra y la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2000).

El objetivo del presente estudio es validar el modelo MOMOS (Micro - Organismos y Materia Orgánica del Suelo) creado por Pansu *et al.*, (2004), con el cual se simula la dinámica del carbono del suelo, centrándose en el funcionamiento de los microorganismos descomponedores como los principales responsables de los procesos metabólicos que producen los cambios de esta materia orgánica. La validación se realizará en diferentes ambientes venezolanos ubicados en un gradiente altitudinal entre 60 y 4000 m, incluyendo ambientes de selva húmeda tropical, sabana estacional, selva semicaducifolia de montaña, selva nublada, páramo andino y páramo altiandino. Esta gama de ambientes con condiciones contrastantes permite validar en un amplio espectro de situaciones tanto de clima como de suelo. Finalmente, una vez validado, el modelo MOMOS se utilizará para predecir las consecuencias del cambio climático sobre los reservorios lábiles y estables de carbono en el suelo. El modelo MOMOS es el eje principal del programa de cooperación interuniversitario PCU/Ecos Nord, integrado por instituciones e investigadores de Venezuela y Francia, que buscan modelizar la materia orgánica en ecosistemas de Venezuela y aplicar los modelos a la gestión de la fertilidad y evaluación del efecto del cambio global. El presente estudio está inserto dentro de este programa de cooperación binacional.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo MOMOS-6 ha sido calibrado y validado para ecosistemas de alta montaña tropical, tales como el Páramo de Gavidia en Venezuela y la Puna de Patacamaya en Bolivia

(Pansu *et al.*, 2006) dentro de un proyecto internacional centrado en el estudio de estos sistemas de altitud. Sin embargo, se plantea la necesidad de ampliar su uso, generando una estructura genérica del modelo, llamado MOMOS, que pueda ser aplicada a otros ecosistemas tropicales con diferentes características de clima y suelo, para predecir las consecuencias del cambio climático sobre los reservorios lábiles y estables del carbono en el suelo, en una amplia gama de condiciones tropicales. Este planteamiento fue posible ya que se tuvo acceso a los resultados de un experimento de campo, en el cual se incubó durante 1.5 a 3 años un material vegetal (paja de trigo) marcado con  $^{14}\text{C}$  en seis sitios que cubrían un amplio gradiente altitudinal andino entre 60 y 4000 m de altitud (El Vigía, Barinas, Tovar, Santa Rosa, Gavidia y El Banco). La duración del experimento fue aumentando con la altura, desde 1.5 años en los sitios más bajos hasta 3 años en los más altos, debido a que la descomposición es más lenta a medida que desciende la temperatura (Coûteaux *et al.*, 2001).

Los trazadores isotópicos, como el  $^{14}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$ , permiten seguir la pista de elementos como carbono, azufre, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno en plantas, suelos, agua y atmósfera.

Generalmente, sus aplicaciones se han centrado en estudios de ecología (ciclos biogeoquímicos, cadenas tróficas y contaminantes) y paleontología, ya que son muy valiosos para interpretar algunos procesos geológicos y ambientales (Abdala, 2000). En este caso particular, el trazador  $^{14}\text{C}$  permite seguir la descomposición del material agregado una vez que el mismo es mezclado con el suelo y enterrado, ya que estima el tiempo de residencia de la materia orgánica y sus fracciones en el suelo.

## 2.1 SITIOS DE ESTUDIO

La información utilizada para la ampliación del modelo MOMOS a diferentes ecosistemas venezolanos proviene de un experimento de incubación *in situ* realizado en seis sitios a lo

largo de una transecta altitudinal en el marco del proyecto TRANSALT de cooperación bilateral entre Venezuela y Francia. Estos sitios se caracterizan por el contraste en sus condiciones de temperatura, precipitación anual, distribución estacional y características del suelo.

### 2.1.1 EL VIGÍA

Es el sitio más bajo, situado a 65 m de altitud, al oeste del estado Mérida, se caracteriza por un clima húmedo tropical, sin una pronunciada estación seca. Su precipitación promedio anual es de 1826 mm y su temperatura promedio anual de 27.4 °C. La vegetación original es de selva húmeda tropical, pero ha sido recientemente deforestada y ahora es usado para la ganadería y la agricultura. El suelo es un Inceptisol, con un 67% de arena, es el más ácido de los sitios de baja altitud y su capacidad de retención de agua es de 31,15% (Coûteaux *et al.*, 2001).

### 2.1.2 BARINAS

Es otro sitio de baja altitud que se encuentra a 165 m, localizado en la parte sur occidental de Venezuela, se caracteriza por tener un clima estacional, con una pronunciada estación seca (diciembre a marzo). Posee una precipitación promedio anual de 1462 mm y una temperatura promedio anual de 26.4 °C. La vegetación natural es de sabana estacional, dominada por gramíneas y árboles aislados. El suelo es un Alfisol, caracterizado por una gran cantidad de arena, baja cantidad de carbono y baja capacidad de retención de agua, en comparación al resto de los sitios de estudio (Coûteaux *et al.*, 2001).

### 2.1.3 TOVAR

Se encuentra en la parte suroeste del estado Mérida, a 780 m de altitud, se caracteriza por un clima estacional de montaña, con cuatro meses secos al año. La precipitación promedio anual es de 1112 mm y la temperatura promedio anual de 23 °C. La vegetación natural es de selva estacio-

nal montana, dominada por árboles semidecíduos, la cual se ha convertido en plantaciones de café y potreros. El suelo es un Molisol, siendo el menos ácido de los sitios, posee un 62% de fracción fina y cerca del 5% de carbono orgánico (Coûteaux *et al.*, 2001).

#### 2.1.4 SANTA ROSA

A 1800 m snm de altitud, está situada en la parte central del estado Mérida, con un clima caracterizado por altas precipitaciones, sin un pronunciado periodo seco, alta nubosidad, baja insolación y alta humedad relativa. Posee una precipitación promedio anual de 1992 mm y una temperatura promedio anual de 17.4 °C. Su vegetación natural es de selva nublada. El suelo es un Inceptisol, cuyo contenido de materia orgánica es el más alto de los seis sitios. Este suelo es el más fértil en términos de capacidad de intercambio catiónico, con una textura similar a la de El Vigía. La capacidad de retención de agua es la más alta de los sitios de estudio. (Coûteaux *et al.*, 2001).

#### 2.1.5 GAVIDIA

Ubicada a 3400 m de altitud, con un clima característico de alta montaña tropical donde las heladas nocturnas están concentradas en la época seca, entre noviembre y marzo. Se localiza al este del estado Mérida. Posee una precipitación promedio anual de 1505 mm y una temperatura promedio anual de 8.9 °C. La vegetación natural es de páramo andino, dominada por rosetas gigantes de *Espeletiaschultzii*(frailejón), entre otras especies. El suelo es un Inceptisol caracterizado por tener una textura fina y el pH más bajo de los sitios de estudio, con interesantes propiedades agronómicas en términos de retención de agua y capacidad de intercambio catiónico (Coûteaux *et al.*, 2001).

#### 2.1.6 EL BANCO

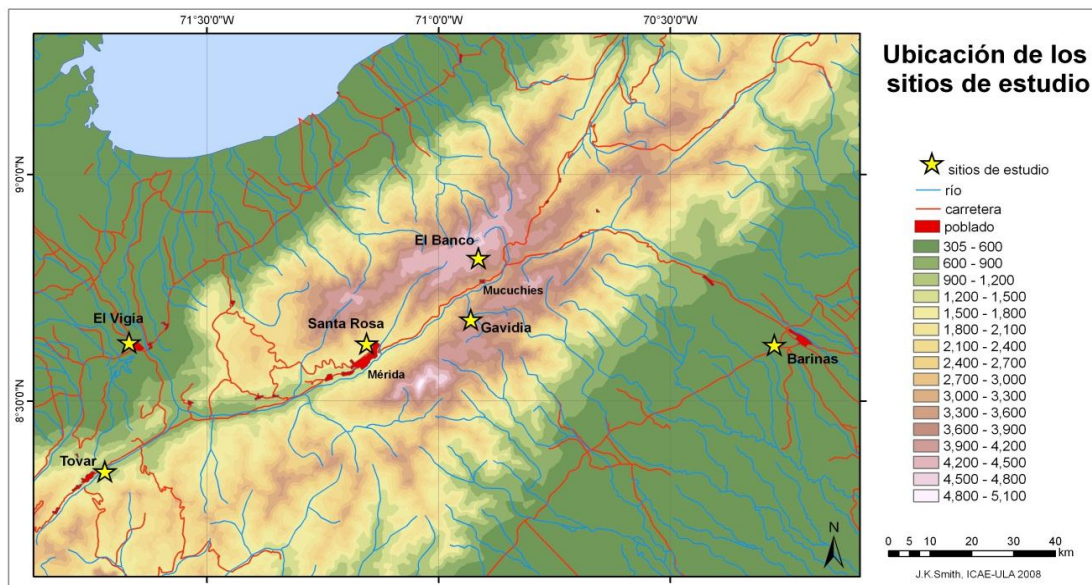
Es el sitio más alto, situado a 3968 m de altitud al noreste del estado Mérida, con un clima tropical de altura caracterizado por heladas frecuentes

durante todo el año. Con una precipitación anual de 790 mm y una temperatura promedio anual de 5.5 °C es el sitio más seco del estudio. Su vegetación natural está dominada por rosetas de *Espeletiaschultzii* arbustos de *Hypericum loricoides*. El suelo es un Entisol, donde la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de retención de agua, es la más baja de los sitios de montaña (Coûteaux *et al.*, 2001). En la figura 1 se aprecia un mapa topográfico con la ubicación de los seis sitios de estudio.

## 2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

El experimento de campo fue desarrollado en cooperación entre investigadores del ICAE y del CEFÉ de Francia y se encuentra parcialmente publicado en Coûteaux *et al.*, (2001). Los resultados fueron cedidos en su totalidad por los autores para la realización de este estudio.

El experimento consistió en la incubación *in situ* de un material vegetal (paja de trigo), marcado con  $^{14}\text{C}$ , en los seis ambientes contrastantes descritos anteriormente. Para cada sitio el material marcado fue mezclado con suelo proveniente del mismo sitio y extraído de la primera capa del perfil (0-10 cm) y la mezcla fue colocada en 40 bolsitas de descomposición enterradas a 5 cm de profundidad. Se realizaron 10 muestreos  $\times$  4 repeticiones en cada sitio, lo que hace un total de 240 bolsas de suelo para el conjunto del experimento. En cada uno de estos muestreos se colectaban 4 bolsitas por sitios para la determinación del  $^{14}\text{C}$  de la biomasa microbiana, el  $^{14}\text{C}$  total remanente y la humedad del suelo. El tiempo de exposición de las bolsas osciló dependiendo de la altura del sitio, desde 18 meses en dos de los sitios más bajos, 24 meses en Tovar, 31 meses en Santa Rosa y 38 meses en los sitios más altos del estudio. El primer muestreo tuvo lugar un mes después de la instalación del experimento y el intervalo de muestreo fue aumentado con el tiempo hasta llegar a los 6 meses al final de la experiencia para los sitios de altura.



**FIGURA 1.** Mapa de ubicación de los seis sitios de estudio (Elaborado por Smith, JK).

### 2.3 OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA

Para organizar los datos climáticos que se necesitan para el cálculo de las funciones de respuesta a la temperatura  $f_t$  y a la humedad del suelo  $f_w$ , se procedió a recopilar y verificar la calidad de la información climática disponible. En los casos en que esta información no estuviera completa para todo el periodo de estudio o no hubiera una estación meteorológica cercana, se utilizaron diferentes métodos para generarla.

### 2.4 SIMULACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN A NIVEL DIARIO

Como en algunos casos no se contaban con datos diarios de precipitación, se tomaron los promedios mensuales calculados a partir de las estaciones vecinas, para luego hacer una conversión de valores mensuales a valores diarios, a través de la aplicación de un Simulador de Lluvia Markoviano (Ablan, 2007), desarrollado en el programa estadístico Lenguaje R®.

### 2.5 ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DIARIA DEL SUELO

Para obtener la dinámica del agua en el suelo que requiere el modelo MOMOS para calcular la

función de respuesta a la humedad, se utilizó el modelo SAHEL. El modelo SAHEL (Soils in semi-Arid Habitat that Easily Leach) fue desarrollado por Penning de Vries *et al.*, (1989) y posteriormente implementado en la herramienta de dinámica de sistemas Vensim® por Metselaar (2003), en el marco del Proyecto TROPANDES. Es un modelo de balance hídrico que considera los procesos de intercepción, escorrentía, infiltración, evaporación, transpiración y drenaje con un enfoque de "tippingbucket". El perfil del suelo se divide en capas, cada una con espesores y características de retención de agua distintas, incluyendo una capa superior de hojarasca. El espesor de la hojarasca y las características físicas de cada capa, son información de entrada al modelo, además de datos climáticos como temperatura y precipitación. La entrada y salida de agua de cada capa se simula a nivel diario.

La capacidad de campo es el parámetro que determina el mayor contenido de agua que puede tener una capa y aquella que exceda este límite drena a la siguiente capa o sale por drenaje desde la última capa hacia fuera del perfil (Penning de Vries *et al.*, 1989). El modelo SAHEL, tal y como fue implementado en Vensim®

por Metselaar (2003), utiliza dos métodos alternativos para calcular la evapotranspiración potencial (ETP), el método de Hargreaves y el de Penman-Monteith. Para nuestro estudio, el modelo SAHEL fue calibrado, utilizando los datos de humedad del suelo medidos en campo. Para la calibración del modelo SAHEL, se organizaron los archivos de entrada en Microsoft Office Excel por cada sitio de estudio, con la información sobre las características de clima y suelo.

## 2.6 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MOMOS-6 EN VENSIM®

El modelo MOMOS-6 describe la dinámica de la materia orgánica del suelo, simulando el crecimiento, respiración y mortalidad de los microorganismos del suelo, como principales impulsores de la transformación y mineralización de los sustratos orgánicos. Este modelo fue el que mejor se ajustó a los datos de descomposición de un material doblemente marcado con  $^{14}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  en un experimento realizado durante dos años en el páramo de Gavidia (Pansu *et al.*, 2004). La característica más importante de este modelo es que coloca a la biomasa microbiana (BM) en el centro, como único compartimiento vivo que respira y es responsable de todas las transferencias de carbono. A continuación se describen los compartimientos del modelo.

### 2.6.1 NECROMASA (NC)

Está formada por residuos sin transformar de plantas y animales. Se divide en dos tipos: La fracción lábil (VL), formada por moléculas de fácil descomposición, como azúcares, proteínas y polisacáridos y la fracción estable (VS), formada por moléculas de difícil descomposición, como lignina y hemicelulosa (Herrera *et al.*, 2001).

### 2.6.2 BIOMASA MICROBIANA (MB)

Es la principal responsable de la descomposición de los residuos orgánicos, del ciclado de nutrientes y del flujo de energía dentro del sistema. Este compartimiento está formado principalmente

por bacterias y hongos descomponedores, que utilizan la necromasa y el humus como fuente de energía, liberando  $\text{CO}_2$  a la atmósfera (Lavelle y Spain, 2005).

### 2.6.3 HUMUS (H)

Son las sustancias orgánicas de color pardo y negruzco, que resultan de la descomposición de la necromasa. Su composición química es compleja, con alta proporción de su carbono en forma de estructuras aromáticas de gran estabilidad y lenta descomposición, esta fracción se asocia a los constituyentes minerales del suelo formando complejos órgano-minerales (Lavelle y Spain, 2005). Durante la evolución de la materia orgánica en el suelo se distinguen dos fases: la humificación y la mineralización.

La humificación es una fase bastante rápida, durante la cual los microorganismos del suelo actúan sobre la materia orgánica. Primero se forma el humus joven, de evolución rápida, que a su vez da paso al humus estable. Ambos productos forman la llamada MOS. Al humus joven también se le llama lábil (HL), porque todavía no está fijado o ligado a las partículas del suelo, sino simplemente mezclado con ellas, tiene una relación carbono-nitrógeno superior a 15 y es objeto de una intensa actividad microbiana y se le puede considerar como un componente fundamental de la fertilidad del suelo. En promedio se estima que constituye entre el 20-25% del humus total. El humus estable (HS), es la materia orgánica ligada al suelo, es decir, sólidamente fijada a los agregados de color oscuro. Su composición es muy compleja (húmina, ácidos húmicos y fúlvicos) y tiene una relación carbono-nitrógeno entre 9-10 y representa en promedio el 75-80% del humus total (Julca *et al.*, 2006). La mineralización del humus estable es muy lenta (1 al 2% al año), liberando así los minerales que luego absorberán las plantas. La intensidad del proceso de mineralización es afectada por numerosos factores, siendo los más importantes: la cantidad

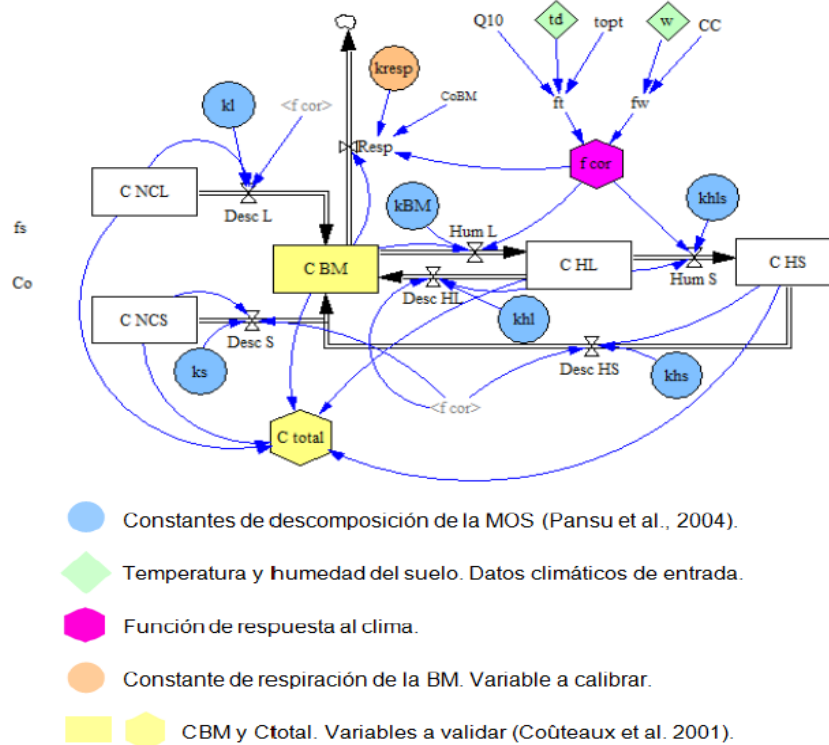


y calidad del sustrato orgánico, la temperatura y la humedad del suelo (Julca *et al.*, 2006).

El modelo MOMOS-6 fue reproducido en Vensim® (versión 5.6b). Como se tiene un solo modelo basado en el funcionamiento de la biomasa microbiana del suelo, el cual deberá ser validado para seis sitios de estudio, con distintos tiempos de simulación (días) y valores de clima y suelo, se usó la opción Subscript del Vensim®, que permite personalizar la estructura del modelo, con diferentes constantes, ecuaciones e incluso múltiples subíndices, es decir, que podemos correr un solo modelo para los 6 sitios de estudio simultáneamente y obtener resultados por separado. Además, se utilizó la descripción y los parámetros publicados en Pansu *et al.*, (2004), pero agregándole la variable Ctotal, la cual suma la cantidad de carbono presente en los cinco compartimientos del modelo, necesaria para la validación del mismo. La reproducción del modelo MOMOS-6 se muestra en la figura 2. El proceso de descomposición de la MOS

comienza con la entrada de necromasa al sistema, la cual se divide en dos fracciones, lábil (C NCL) y estable (C NCS), dependiendo de la calidad de la misma (fs). Estos residuos son transformados por acción de los organismos descomponedores quienes los incorporan en su biomasa (C BM), los transforman en nuevos productos orgánicos (humus lábil (C HL) y estable (C HS)) o los mineralizan (CO<sub>2</sub>). La dinámica con la que ocurren estos procesos está determinada por una serie de coeficientes (constantes de velocidad) además de factores climáticos como la temperatura y la humedad del suelo.

- **Constantes de descomposición de la MOS.** Son las que determinan el flujo de carbono entre los compartimientos, están expresadas en día<sup>-1</sup> y sus valores fueron tomados del artículo de Pansu *et al.*, (2004).
- **Datos climáticos de entrada.** Vienen dados por la temperatura diaria (td) y por



**FIGURA 2.** Esquema del modelo MOMOS-6 reproducido en el software Vensim®.

la humedad diaria del suelo ( $w$ ). Ambas variables climáticas fueron organizadas en dos archivos Microsoft Office Excel, correspondientes al periodo del experimento de cada sitio de estudio.

- **Función de respuesta al clima ( $f_{cor}$ ).** Es el producto de la función de respuesta a la temperatura  $f_t$  y de la función de respuesta a la humedad del suelo  $f_w$ . Esta función de respuesta al clima ajusta los valores de los parámetros del modelo a las condiciones climáticas de cada sitio e influencia todas las transferencias que ocurren en el modelo.
- **Constante de respiración de la BM ( $k_{resp}$ ).** Este parámetro es necesario para calcular la respiración de la biomasa microbiana ( $Resp$ ). Esta respiración se rige por el coeficiente metabólico de respiración  $qCO_2$  (día<sup>-1</sup>), el cual indica cuánto se respira por unidad de biomasa.

## 2.7 ESTRATEGIA DE VALIDACIÓN DEL MODELO MOMOS

Para validar el modelo MOMOS es necesario calibrar la constante de respiración de la biomasa microbiana ( $k_{resp}$ ) y calcular de la función de respuesta al clima ( $f_{cor}$ ) para cada sitio de estudio. Las variables medidas que se utilizan para calibrar  $k_{resp}$  y evaluar el modelo son el carbono marcado de la biomasa microbiana ( $C_{BM}$ ) y el carbono marcado total del sistema ( $C_{total}$ ), las cuales serán comparadas con la salida del modelo. Para calibrar  $k_{resp}$  se tomó un valor inicial de 0.03 día<sup>-1</sup> del estudio realizado por Pansu et al., (2001) para los seis sitios y se definió un intervalo para este parámetro entre [0-0,1] en el módulo *Optimization* del Vensim®, con la intención de que el programa estime el valor de  $k_{resp}$  óptimo para cada sitio. Vensim® genera varias simulaciones con un valor *Payoff* (mejor ajuste con los datos medidos), donde se escogen los valores de  $k_{resp}$  asociados al mejor valor de *Payoff*. Con estos valores calibrados de  $k_{resp}$  por cada sitio de estudio, se realiza el proceso de validación del modelo MOMOS para el gradiente altitudinal.

## 2.8 MÉTODOS ESTADÍSTICOS DE EVALUACIÓN PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO MOMOS

Para evaluar los resultados de la calibración del modelo SAHEL y la validación del modelo MOMOS, se usó el porcentaje de la raíz del error cuadrático medio (%RMSE), el cual nos da una medida de las diferencias porcentuales entre los valores simulados y los observados. De igual manera, el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe ( $NS$ ), es usado para evaluar la eficiencia de los resultados de las simulaciones.

## 2.9 APLICACIÓN DEL MODELO MOMOS: RESPUESTA DE LA MOS A ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN VENEZUELA

En la Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela, emitida por la Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN), se analizaron los patrones espacio-temporales de la precipitación y la temperatura para el futuro. Para simular estos comportamientos, que son modificados por los cambios en el sistema climático inducidos por el calentamiento global, debido a la mayor cantidad de gases de efecto invernadero, se usan modelos acoplados de la circulación general atmosfera-oceano corridos para diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (Martelo, 2004). Un taller de expertos en meteorología y climatología, definió los escenarios climáticos y seleccionó los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero y los modelos usados para el análisis climático. El escenario SRES-A2, es usado para cambios climáticos intermedio y pesimista y SRES-B1 para un cambio climático optimista. El escenario optimista es el que simula menores cambios en la temperatura y la precipitación, mientras que el escenario pesimista es el que simula los mayores cambios de estas variables en el futuro. Según la opinión de los expertos, para nuestro país se espera un aumento de la temperatura media, debido principalmente a un



Escenarios Climáticos			
Escenarios de emisión de gases por efecto invernadero	Optimista	Intermedio	Pesimista
		SRES-B1	SRES-A2
Sensibilidad Climática	Baja (1.5°C)	Media (2.5°C)	Alta (4.5°C)
Periodos	2005-2035 (centrado en 2020)	2005-2035 (centrado en 2020)	2005-2035 (centrado en 2020)
	2025-2055 (centrado en 2040)	2025-2055 (centrado en 2040)	2025-2055 (centrado en 2040)
	2045-2075 (centrado en 2060)	2045-2075 (centrado en 2060)	2045-2075 (centrado en 2060)
Modelos	UKTR y CCC-EQ	UKTR y CCC-EQ	UKTR y CCC-EQ

**CUADRO 1.** Escenarios de cambio climático en Venezuela (Martelo, 2004).

aumento de las temperaturas nocturnas, así como una disminución de la precipitación, acompañada por un incremento de eventos extremos (Martelo, 2003). Se usaron los modelos UKTR, desarrollado por el *United Kingdom Meteorological Office* (Inglaterra) y el CCC-EQ, desarrollado por el *Canadian Center for Climate Modelling and Analysis* (Canadá). Estos modelos simulan el cambio promedio de temperatura y precipitación para lapsos de 30 años. En el cuadro 1, se especifican los escenarios climáticos, lapsos y modelos de circulación global de la atmósfera usados en la Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela (Martelo, 2003).

Ambos modelos simulan un incremento de la temperatura y para la lluvia la incertidumbre es mucho mayor, ya que un modelo simula un futuro más lluvioso y otro un futuro más seco para Venezuela.

### 2.9.1 CAMBIOS EN LOS PATRONES DE TEMPERATURA PARA EL AÑO 2060

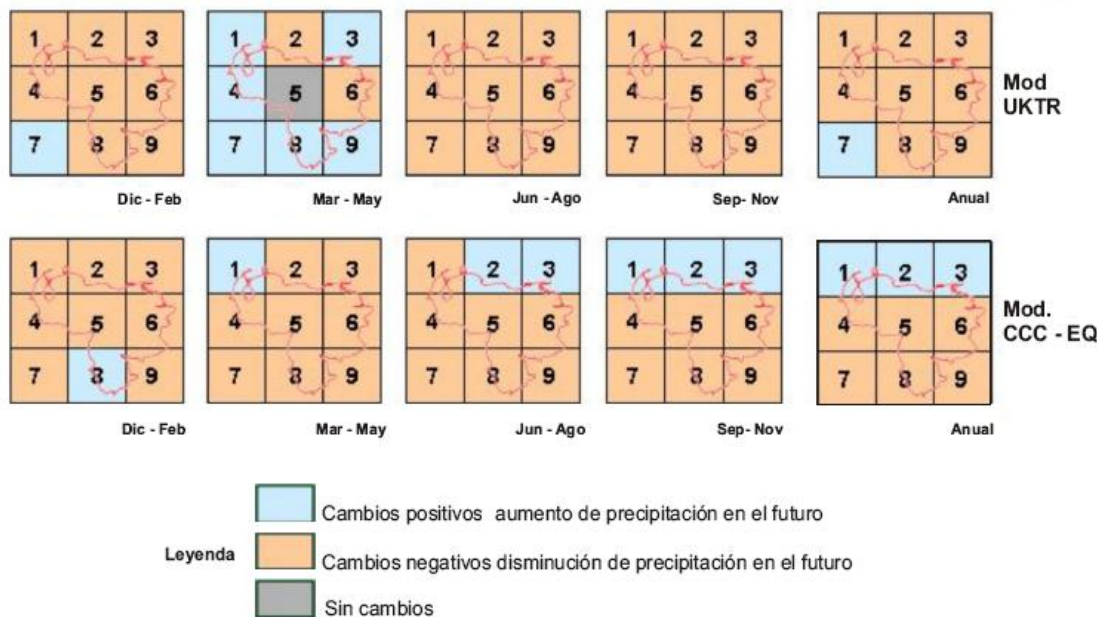
Para la temperatura en general, el modelo CCC-EQ simula menores cambios que el UKTR, tanto en el escenario optimista (para el año 2060 no superan los 0,7°C y los 1,3°C respectivamente), como en el escenario pesimista (para el 2060 alcanzan los 1,9°C y 3,8°C respectivamente). El modelo UKTR simula incrementos de temperatura especialmente hacia el sur del país (Martelo, 2004).

### 2.9.2 CAMBIOS EN LOS PATRONES DE PRECIPITACIÓN PARA EL AÑO 2060

El modelo británico UKTR, simula menos precipitación en todo el país durante todo el año, excepto durante el trimestre de Marzo-Mayo, mientras que el modelo canadiense CCC-EQ, simula un futuro más lluvioso al norte del paralelo 10° N en varios trimestres y el total anual. En la figura 3, se muestran los signos de los cambios de precipitación para los periodos trimestral y anual para cada grilla del país, donde los signos son consistentes para todos los escenarios climáticos, en los tres lapsos analizados.

En la figura 3, se observa que aunque ambos modelos apuntan a un futuro en general más seco, simulan mayor precipitación en algunas grillas en algún momento del año. Ambos modelos simulan adecuadamente el efecto de El Niño en el país, donde el trimestre correspondiente a la temporada seca (Dic-Feb) usualmente es más seco que lo normal. El CCC-EQ simula al norte del país un ligero incremento de la lluvia (+7,4% en el escenario pesimista en 2060), mientras que en la grilla 4, correspondiente a la parte Andina, es donde simula un futuro más seco (-19,4% en el escenario pesimista).

El UKTR tiene en general valores de cambio mayores; las zonas que simula como más



**FIGURA 3.** Representación esquemática del signo de cambio de la precipitación, según los modelos UKTR y CCC-EQ (Martelo, 2004).

afectadas son las grillas 5, 6 y 9 (los Llanos centrales y orientales, el Delta y el sur de Bolívar), con valores de  $-22\%$  a  $-27\%$  en el escenario pesimista, mientras que el efecto simulado en los Andes es mínimo. Es al norte del país donde los modelos más difieren; simulando el UKTR un futuro más seco y el CCC-EQ un futuro más lluvioso. Considerando la variabilidad temporal, el trimestre de entrada de aguas Marzo-Mayo, es el que presenta mayores diferencias: el UKTR lo simula en general como lluvioso, mientras que el CCC-EQ lo simula seco. Ambos modelos coinciden en señalar un futuro más seco desde Junio hasta Febrero en toda la franja central del país, desde los Andes hasta los Llanos Orientales y norte de Bolívar, así como en el extremo sur de Bolívar y extremo norte del Zulia (Martelo, 2004).

Para la aplicación del modelo MOMOS, sobre la respuesta de la MOS a escenarios de cambio climático en Venezuela, se usará el escenario pesimista (centrado en el año 2060) en el que las temperaturas aumentan  $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que la precipitación disminuye en un  $19,4\%$  por cada evento diario de lluvia, según el modelo CCC-EQ para la parte andina de

Venezuela, para analizar la influencia del cambio climático sobre la dinámica del  $C_{total}$  para cada sitio de estudio. Primero, se debe calcular la humedad del suelo, utilizando el modelo SAHEL, para calcular el factor de respuesta a la humedad con los cambios propuestos en el escenario pesimista, para la parte andina. Para analizar el efecto del cambio propuesto en la función de respuesta al clima sobre la descomposición de la paja. Luego, en un primer ejercicio, se simulará el efecto del cambio climático sobre la descomposición de la paja marcada, considerando la misma cantidad de paja marcada que fue utilizada en el experimento de campo pero modificando los valores de las funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo. En un segundo ejercicio, se intenta visualizar el efecto del cambio climático sobre la materia orgánica total del suelo. Con este fin se asume que la necromasa que entra a cada ecosistema es similar a la paja de trigo y la entrada anual de necromasa necesaria es calculada para mantener el nivel de materia orgánica medida en cada sitio bajo las condiciones climáticas actuales. Luego, se cambian las

condiciones climáticas y se corre el modelo durante 64 años para analizar los cambios en los diferentes compartimientos. Esta aplicación supone que en el escenario de cambio escogido los aportes de necromasa se mantienen iguales.

### 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 3.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO SAHEL

Una vez obtenida la precipitación diaria de los diversos sitios de estudio, se procedió a calibrar el modelo SAHEL, para obtener la humedad diaria del suelo que se necesita para la validación del modelo MOMOS. Esta calibración se realizó seleccionando los valores de los parámetros del modelo que mejor reprodujeran el agua medida en el suelo en los diez puntos de muestreo. Primero, se identificaron los parámetros del modelo SAHEL que se relacionan con las propiedades físicas del suelo y de la vegetación, los cuales se calibraron de manera independiente, para identificar los más sensibles del modelo, es decir, los de menor *Payoff* (mejor ajuste con los datos medidos). Luego, se calibraron en conjunto para obtener el mejor ajuste de estos parámetros con respecto a sus valores iniciales. Los resultados de la calibración del modelo SAHEL para los diferentes sitios se muestran en el cuadro 2. No se discutirá el significado de los diferentes parámetros o los valores encontrados en los diferentes sitios por escapar del objetivo de este estudio.

Con estos valores calibrados, se corrió de nuevo el modelo SAHEL para obtener los valores de humedad diaria para la primera capa de

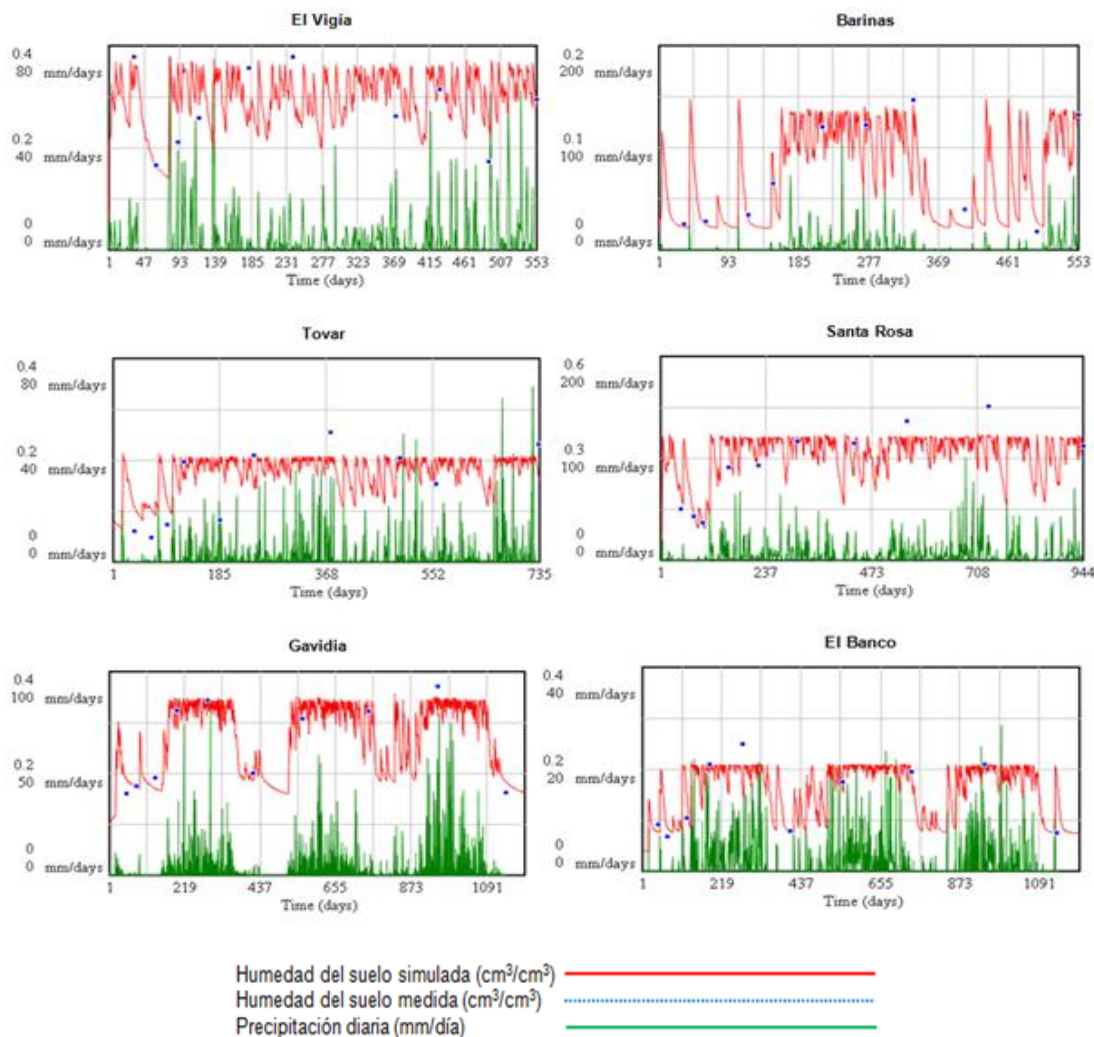
suelo, definida con un espesor de 0-10 cm, ya que en ella se ubicaron las bolsitas de descomposición. Seguidamente, se calculó el porcentaje de la raíz del error cuadrático medio (*%RMSE*) y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (*NS*) como métodos estadísticos, para medir la bondad de ajuste de la salida del modelo con respecto a la humedad medida en los diez muestreos realizados durante el experimento de campo. La valoración del *%RMSE* muestra que Gavidia tuvo el mejor ajuste entre los valores de humedad simulados y medidos, con un valor menor al 10% la simulación se considera Excelente, seguido de Barinas con una valoración Buena, ya que su resultado se ubica entre 10% y 20%, el Vigía y Santa Rosa con una valoración Regular, ya que sus resultados se ubican entre 20% y 30% y finalmente Tovar y el Banco con una valoración Mala, ya que el *%RMSE* es mayor al 30%. De igual manera el *NS*, indica que la calibración del modelo SAHEL para Barinas y Gavidia fue buena, con más del 90% de la varianza de los datos explicada por el modelo, mientras que para Tovar, Santa Rosa y el Banco no fueron muy buenas y finalmente El Vigía resulto deficiente, con un valor cercano a 0. En la figura 4 se muestra la humedad generada por el modelo SAHEL, para la primera capa de suelo.

En la figura 4, se observa que los valores obtenidos por el modelo SAHEL para El Vigía se adaptan a los valores medidos de humedad, ya que al inicio se muestra una humedad alta, la cual se mantiene hasta que se termina el periodo lluvioso, momento en el cual comienza a disminuir la humedad del suelo,

Parámetros	El Vigía	Barinas	Tovar	Santa Rosa	Gavidia	Banco
<b>Lai</b>	1	1.3943	2.7055	1	3.9153	3.53
<b>BI</b>	0.75	0.7945	0.9256	0.9473	0.7269	1
<b>Parnonl</b>	2.39	1	1	1	1	5
<b>Kc</b>	1	1.1823	0.8513	1.4062	1.5548	0.9760
<b>Wewp</b>	0.1629	0.0233	0.1	0.2968	0.1809	0.0710
<b>Wcfc</b>	0.3782	0.1469	0.2138	0.3771	0.3567	0.2142
<b>Wcad</b>	0.0593	0.0208	0.01	0.01	0.1536	0.0415

**CUADRO 2.**

Parámetros calibrados del modelo SAHEL que permiten el mejor ajuste entre el agua simulada en la primera capa del suelo (0-10 cm) y los valores de humedad medidos en las bolsitas de descomposición.



**FIGURA 4.** Humedad del suelo simulada para los sitios de estudio con el modelo SAHEL previamente calibrado.

comportamiento que se mantiene a lo largo de todo el periodo de sequía y aumenta abruptamente al comenzar las lluvias, a partir de este momento el valor de la humedad simulada se mantiene cerca de la capacidad de campo ( $0.3782 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ), con ligeras fluctuaciones debido a la variación de la frecuencia o magnitud de las lluvias, observándose que el modelo es sensible a la variación de la precipitación.

Para Barinas, se muestra un comportamiento muy diferente al de El Vigía, ya que en esta localidad el periodo seco está bien marcado, con periodos largos en que la humedad del suelo se mantiene baja, dinámica que es simulada

correctamente por el modelo SAHEL. Durante la época seca se observan aumentos puntuales de la humedad que siguen a eventos aislados de lluvia, en particular cuatro días de lluvia durante el primer periodo de sequía, luego la humedad va aumentando progresivamente a medida que aumenta la frecuencia de las lluvias hasta alcanzar un valor cercano a la capacidad de campo ( $0.1469 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) hasta disminuir nuevamente en el siguiente periodo de sequía y aumenta al comienzo de un nuevo periodo lluvioso.

Para Tovar, se observa que los valores simulados reflejan la presencia de dos periodos

secos, el primero más severo que el segundo, en el cual se presentaron varios eventos de lluvia que hicieron fluctuar el agua en el suelo. El ajuste con los datos medidos no es del todo bueno, observándose que las medidas durante la primera época seca están por debajo de la humedad simulada, luego se mantiene al ritmo de la magnitud y frecuencia de las lluvias alcanzando valores cercanos a la capacidad de campo ( $0.2138 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ).

De igual manera se observa que en Santa Rosa, sitio correspondiente a las condiciones ecológicas de Selva Nublada, los valores simulados van acorde con la dinámica de los valores medidos, con una corta estación seca el primer año y luego oscilaciones menos marcadas de la humedad que se mantiene en general bastante cerca de la capacidad de campo ( $0.3772 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ). El valor máximo de humedad medido, de  $0.4516 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  ocurrió debido a una lluvia de 100.4 mm ocurrida el día 20-01-1997, que llevó al suelo a condiciones de saturación, superando el valor de capacidad de campo.

Para Gavidia, se muestra que los valores arrojados por el modelo simulan muy bien la secuencia de periodos secos y húmedos para los tres años del estudio. Donde los valores medidos tienen un buen ajuste con los valores de precipitación, ya que los mismos siguen las dinámicas de las magnitudes y frecuencias de las lluvias durante los periodos de sequía y lluviosos, hasta alcanzar un máximo valor de humedad de  $0.3712 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , momento en el que descende debido a la baja cantidad de lluvia.

Para El Banco, se observa que al igual que en Gavidia la simulación de la alternancia de periodos secos y húmedos durante los tres años de estudio es muy clara, con una buena concordancia con los valores medidos. El quinto punto de humedad de medida en campo presenta un valor muy alto (*outlayer*), bastante por encima de la capacidad de campo ( $0.2142 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ), probablemente porque el suelo fue colectado

en condiciones de saturación, poco tiempo después de una lluvia, y el modelo no simula estos periodos de saturación ya que drena instantáneamente hacia la capa inferior el agua que excede la capacidad de campo.

### 3.2 CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE RESPUESTA A LA TEMPERATURA Y A LA HUMEDAD DEL SUELO PARA EL MODELO MOMOS

Estas funciones de respuesta vienen dadas por dos variables climáticas, temperatura diaria y humedad diaria del suelo, las cuales influyen a todas las constantes de velocidad del modelo permitiendo incluir el efecto del clima de cada sitio sobre la dinámica de la descomposición simulada por el modelo MOMOS. Estas funciones se describen a continuación.

#### 3.2.1 FUNCIÓN DE RESPUESTA A LA TEMPERATURA $F_T$

Se calcula a partir de la temperatura diaria en  $^{\circ}\text{C}$  de cada sitio de estudio. Los valores diarios que toma esta función en los diversos sitios de estudio son valores muy cercanos a 1 en los sitios de baja altitud (El Vigía y Barinas) ya que las temperaturas promedio diarias de estos sitios se acercan a la temperatura óptima de  $28^{\circ}\text{C}$  utilizada en  $f_t$ , no representando una limitación para la descomposición. Los valores de la función de temperatura disminuyen a medida que ascendemos hasta los sitios de mayor altitud como Gavidia y el Banco, dado que las temperaturas de estos sitios están muy por debajo de la temperatura óptima para la descomposición. En el cuadro 3, se observan los valores promedios de la función de respuesta a la temperatura, donde para Tovar la descomposición se reduce en aproximadamente un 20% por efecto de la temperatura, en Santa Rosa un 50% en promedio, en Gavidia un 70% y en El Banco un 80%. Esto quiere decir que por efecto de la temperatura, un material o residuo tarda 5 veces más en descomponerse en El Banco que en El Vigía.



### 3.2.2 FUNCIÓN DE RESPUESTA A LA HUMEDAD DEL SUELO

$F_w$

Se calcula a partir de la humedad diaria del suelo en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , obtenida por el modelo SAHEL en cada sitio de estudio. La función  $f_w$  se acerca a 1 a medida que la humedad del suelo se acerca a la capacidad de campo de cada sitio. Puede observarse que los dos sitios de baja altitud, El Vigía y Barinas, que presentaban bastante similitud en su función de respuesta a la temperatura, se diferencian bastante en su respuesta a la humedad, con un valor promedio para El Vigía de 0,80 y para Barinas de 0,50, mientras que Tovar y Santa Rosa tienen en promedio casi los mismos valores de la función de respuesta a la humedad, al igual que Gavidia y El Banco. En resumen puede observarse que tres de los sitios son marcadamente estacionales, lo que impone una limitación importante a la descomposición (Barinas, Gavidia, El Banco), mientras que los otros tres sitios son menos estacionales. En el cuadro 3, se muestran a manera de resumen los valores promedios de la función de respuesta a la humedad del suelo para cada sitio de estudio.

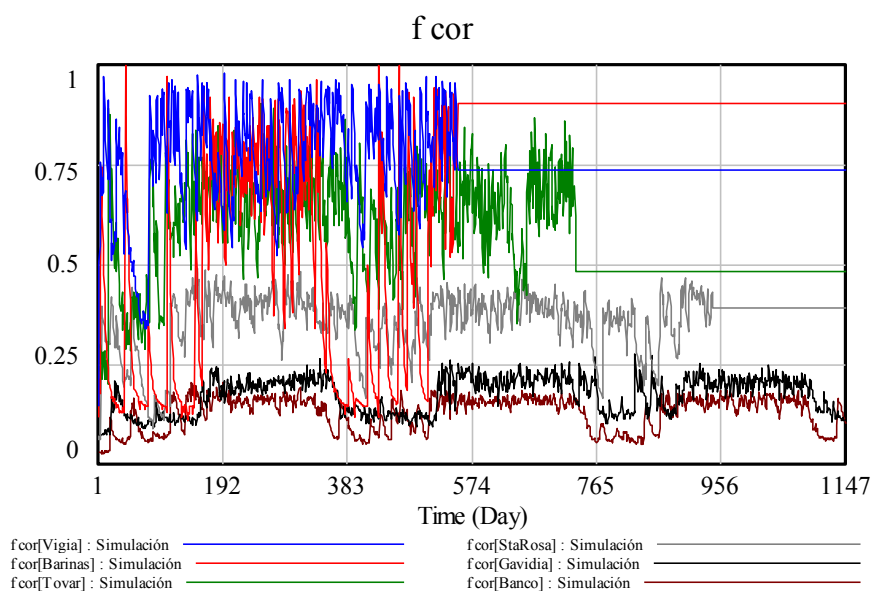
Una vez obtenidas estas funciones de respuesta, se calculó la función de respuesta al

clima, como producto de las funciones anteriores. Los valores diarios de la respuesta combinada a la temperatura y la humedad se muestran en la figura 5 para cada sitio de estudio y en el cuadro 3 se presentan los valores promedios para el periodo de estudio de cada sitio.

### 3.3 CALIBRACIÓN DE LA TASA DE RESPIRACIÓN DE LA BIOMASA MICROBIANA ( $k_{RESP}$ )

Como se explicó anteriormente, una vez obtenidos los valores diarios de las funciones de respuesta  $f_t$  y  $f_w$ , el modelo fue corrido utilizando los valores de los parámetros que fueron calibrados por Pansu *et al.*, (2004) y se recalibró únicamente la constante de respiración de la biomasa microbiana ( $k_{resp}$ ), a partir de un valor inicial de  $0.03 \text{ dia}^{-1}$  tomado también de Pansu *et al.*, (2004) para obtener el mejor ajuste de este parámetro para cada sitio de estudio. Esta calibración se realizó a partir de la función *Optimization* del programa Vensim® (con las mismas especificaciones para Vensim® usadas para la calibración del modelo SAHEL) y tomando como criterio el mejor ajuste simultáneo y el mismo peso a los datos de carbono total remanente y carbono en la biomasa microbiana

**FIGURA 5.** Valores diarios de la función de respuesta al clima en los seis sitios de estudio, durante el intervalo de incubación.





	El Vigía	Barinas	Tovar	Santa Rosa	Gavidia	El Banco
$f_t$	0,9760	0,9700	0,7556	0,4281	0,2299	0,1720
$f_w$	0,7842	0,4831	0,8126	0,8201	0,7515	0,7419
$f_i * f_w$	0,7654	0,4686	0,6140	0,3511	0,1727	0,1276

**CUADRO 3.** Valores promedios de la función de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo durante todo el periodo del experimento de campo.

medidos para cada sitio. Los resultados de esta calibración se muestran en el cuadro 4.

### 3.4 VALIDACIÓN DEL MODELO MOMOS

Una vez calculada la función de respuesta al clima y los valores de la constante de respiración microbiana ( $k_{resp}$ ) para cada sitio de estudio, se procedió a validar el modelo MOMOS, para dar cumplimiento con el objetivo del estudio. Esta validación consistió en comparar los valores medidos de carbono de la biomasa microbiana y el carbono total con los valores arrojados por el modelo. Se realizó una simulación para cada variable. Los resultados de esta validación se muestran en las figuras 6 y 7. En la tabla 5 se muestra la estadística aplicada para la validación del modelo MOMOS, a través del porcentaje de la raíz del error cuadrático medio (%RMSE) y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NS).

La figura 6 muestra que en general el  $C_{total}$  simulado para los seis sitios se ajusta bastante bien a los datos medidos en el experimento de campo. Se calcularon las desviaciones estándar de los diez puntos medidos en función de las cuatro réplicas de campo para cada muestreo, observándose que los valores simulados están bastante cercanos a la media de los valores medidos.

Para el  $C_{BM}$  en la figura 7 se observa que el ajuste entre los valores simulados y medidos no fue tan bueno como el del  $C_{total}$ . Al inicio de la descomposición se observa un pico, el cual se relaciona con el rápido consumo de la fracción lábil por parte de los microorganismos. Este pico no se puede verificar con los datos experimentales, ya que para El Vigía, Barinas, Tovar y Santa

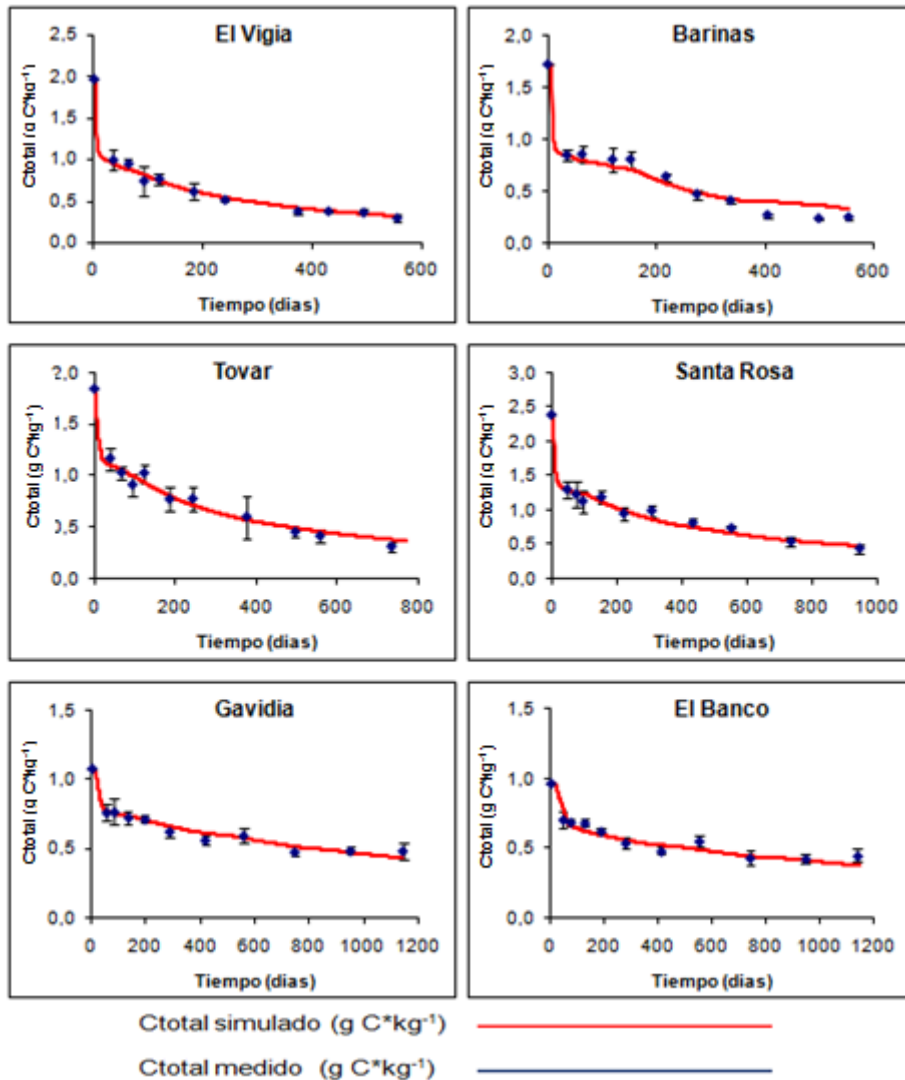
Sitios	$k_{resp}$ (día <sup>-1</sup> )
El Vigía	0,029
Barinas	0,038
Tovar	0,034
Santa Rosa	0,030
Gavidia	0,021
EL Banco	0,022

**CUADRO 4.** Valores calibrados de la constante de respiración microbiana ( $k_{resp}$ ) para cada sitio de estudio, manteniendo los valores de los otros parámetros según Pansu *et al.*, (2004), considerando los datos medidos de carbono total remanente y de carbono en la biomasa microbiana.

Rosa se presenta antes de la primera medición, mientras que para Gavidia y el Banco, el pico tarda más, ya que en estos sitios de altura el proceso de descomposición es más lento y no es verificado por los datos que muestran una biomasa menor que la simulada, por lo que pareciera que el mecanismo de simulación de la biomasa microbiana en esta primera etapa de la simulación no funciona correctamente o que pudieran existir errores metodológicos en la determinación del  $C_{BM}$ .

Sitios	$C_{total}$		$C_{BM}$	
	%RMSE	NS	%RMSE	NS
El Vigía	6,773	0.9716	20,6124	0.8058
Barinas	14,3217	0.8917	20,076	0.7729
Tovar	7,757	0.9563	42,3538	0.3374
Santa Rosa	6,8057	0.9476	15,8148	0.8674
Gavidia	4,7044	0.9277	52,5596	-17.186
El Banco	8,3733	0.7986	221,189	-383.286

**CUADRO 5.** Evaluación de la bondad de ajuste entre los valores simulados por el modelo MOMOS y los datos medidos en campo utilizando el %RMSE y el NS para el  $C_{total}$  y el  $C_{BM}$ .



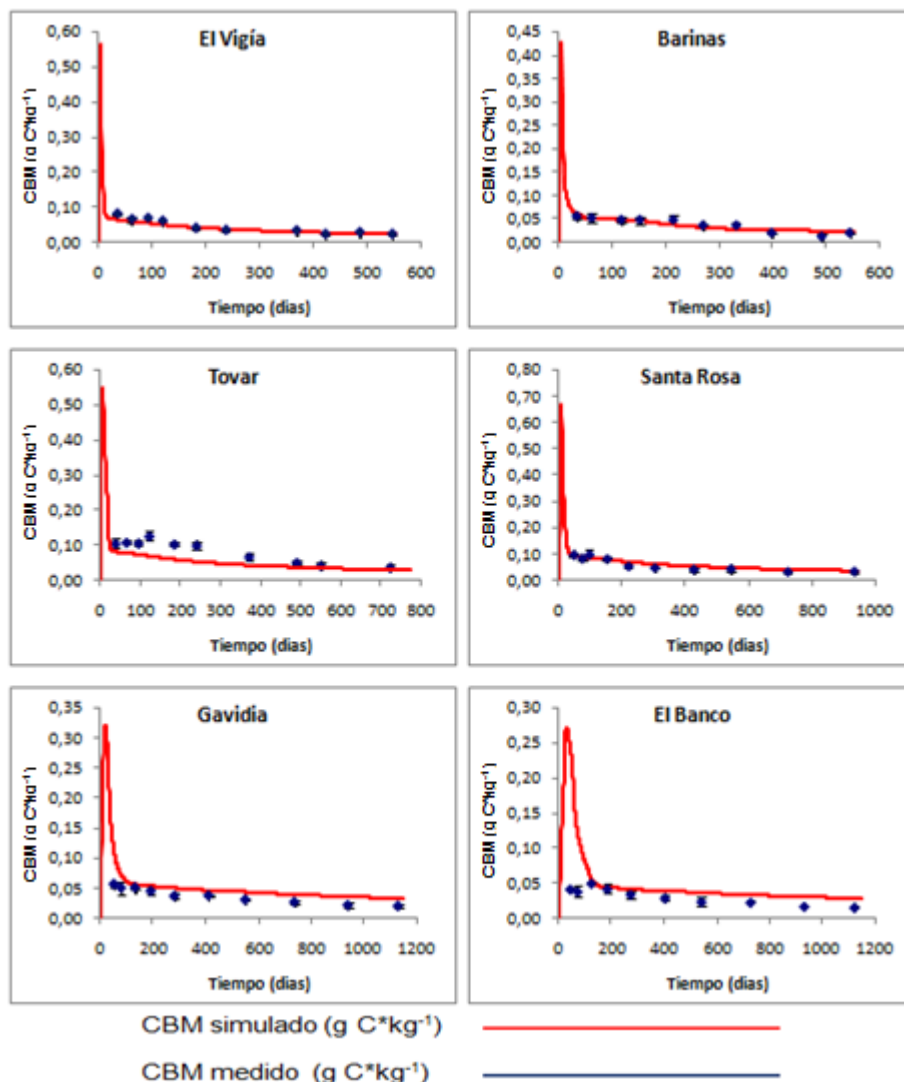
**FIGURA 6.**

Simulación por el modelo MOMOS del  $C_{total}$  y datos medidos en el experimento de campo. Se muestra el promedio y la desviación estándar de las cuatro réplicas de campo para cada muestreo.

Los resultados expuestos en el cuadro 5 para el carbono total, muestran que El Vigía, Tovar, Santa Rosa, Gavidia y el Banco dan un excelente resultado, ya que sus valores son menores al 10%, mientras que Barinas tuvo una buena valoración, ya que su resultado se ubica entre 10% y 20%, según la valoración del estadístico. Por el contrario, los resultados del %RMSE muestran que Santa Rosa tuvo un buen ajuste entre los valores del carbono de la biomasa microbiana medidos y los valores arrojados por el modelo MOMOS, seguido de El Vigía y Barinas con una valoración Regular y Tovar con una

valoración Mala. En los sitios de páramo, existe una gran dispersión entre los valores medidos y simulados y en consecuencia la valoración es Mala.

De igual manera, el NS para el carbono total del sistema, tuvo un buen ajuste entre los valores simulados y observados para los seis sitios de estudio. Mientras que el NS, para el carbono de la biomasa microbiana, tuvo un buen ajuste para El Vigía, Barinas y Santa Rosa, ya que sus resultados son cercanos a 1, mientras que para Tovar, la predicción no fue precisa con respecto a la media de los datos observados, con



**FIGURA 7.** Simulación por el modelo MOMOS del  $C_{BM}$  y datos medidos en el experimento de campo. Se muestra el promedio y la desviación estándar de las cuatro réplicas de campo para cada muestreo.

un valor bajo y finalmente para Gavidia y el Banco, obtuvieron valores negativos, que indican que la media observada es mejor que la predicción del modelo. En síntesis, con la aplicación de los estadísticos  $\%RMSE$  y  $NS$  se puede afirmar que la dinámica de la  $BM$  no fue simulada satisfactoriamente en algunos sitios, lo que resulta paradójico dado que es el compartimiento central del modelo, mientras que el  $C_{total}$  tuvo un ajuste muy satisfactorio entre los valores simulados y los medidos en los seis sitios de estudio. Es decir que si bien la biomasa microbiana se simula con un éxito relativo, la dinámica

del carbono total es simulada con mucha precisión considerando el clima de cada sitio y variando un solo parámetro.

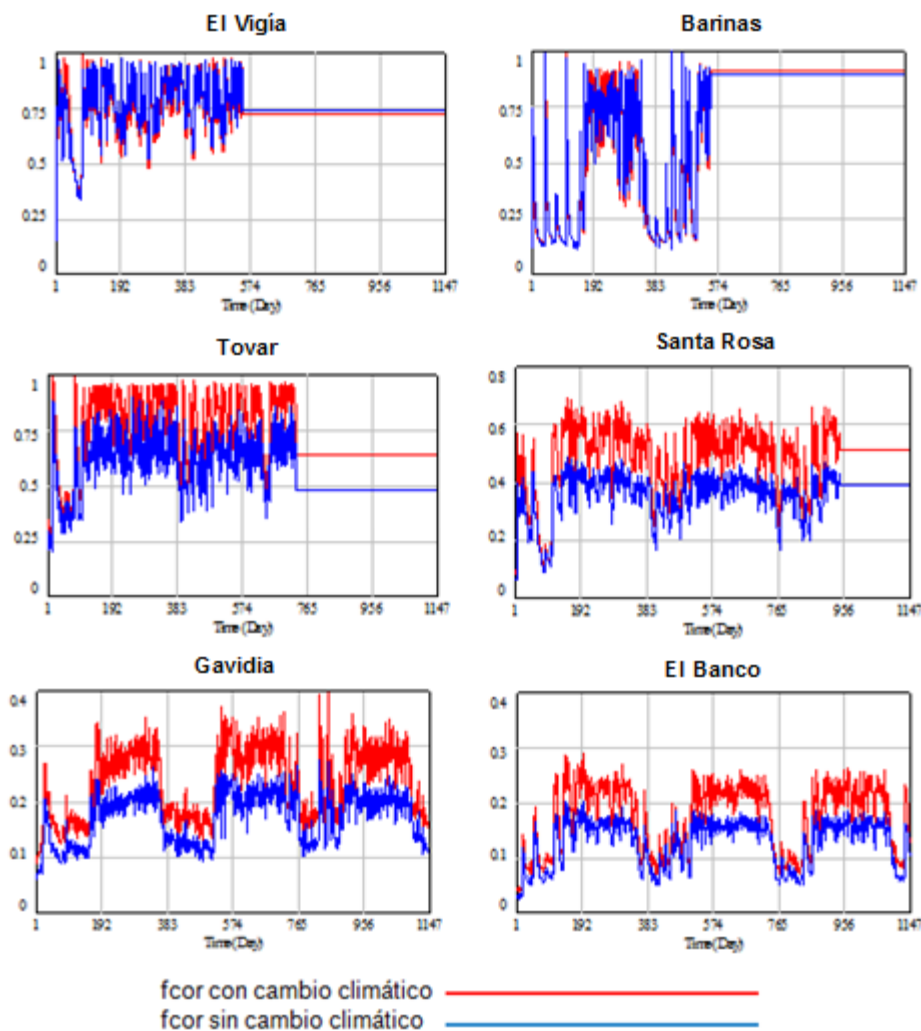
### 3.5 SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DE LA MOS EN LOS DIFERENTES ECOSISTEMAS ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN VENEZUELA

Se consideró como cambio climático al aumento de  $4,5^{\circ}C$  en la temperatura del aire y una disminución de  $19,4\%$  en la precipitación diaria, para el año 2060 sobre la parte andina de Venezuela, tomando el escenario pesimista según Martelo (2004), para simular la influencia

del cambio climático sobre la dinámica de la materia orgánica del suelo en los seis sitios de estudio. Con los cambios propuestos a estas variables, se obtuvo nuevamente la humedad del suelo, utilizando el modelo SAHEL. El primer paso fue analizar la influencia del cambio climático sobre las funciones de respuesta al clima (Figura 8). Las líneas de color azul muestran la situación del clima medido durante el experimento de campo, mientras que las líneas de color rojo muestran la situación del clima previsto para el año 2060 con el escenario pesimista. Nótese que las escalas son diferentes para cada sitio.

La figura 8, muestra que para el Vigía y Barinas no se observan mayores diferencias en la función de respuesta combinada, mientras que para Tovar, Santa Rosa, Gavidia y el Banco, esta función de respuesta tiende a aumentar, lo que indicaría que los diferentes procesos de la dinámica del carbono procederían más rápidamente. De igual manera se muestran en el cuadro 6 los promedios de los valores diarios de cada función de respuesta al clima para el periodo de estudio.

En el cuadro 6, se observa que la función de respuesta a la temperatura  $f_t$  aumenta con el cambio climático para los 6 sitios, pero en El



**FIGURA 8.** Dinámica diaria de la función de respuesta combinada a la temperatura y a la humedad del suelo  $f_t * f_w$  con cambio y sin cambio climático para cada sitio de estudio.

Sitios	Sin cambio climático			Con cambio climático		
	$f_t$	$f_w$	$f_t * f_w$	$f_t$	$f_w$	$f_t * f_w$
Vigía	0,9759	0,7843	0,7658	0,9998	0,7544	0,7542
Barinas	0,9701	0,4801	0,4618	1,0000	0,4484	0,4484
Tovar	0,7555	0,8125	0,6136	0,9868	0,7813	0,7709
Santa Rosa	0,4281	0,8202	0,3521	0,6104	0,7864	0,4816
Gavidia	0,2299	0,7515	0,1723	0,3278	0,7209	0,2356
Banco	0,1720	0,7422	0,1280	0,2453	0,7064	0,1737

**CUADRO 6.** Influencia del cambio climático propuesto en el escenario pesimista para el año 2060 sobre las funciones de respuesta a la temperatura  $f_t$ , a la humedad del suelo  $f_w$  y la función combinada  $f_t * f_w$ .

Vigía y Barinas el aumento es insignificante debido a que estos dos sitios ya se encontraban muy cerca de la temperatura óptima para la descomposición. En los demás sitios se observa un aumento más importante de la función de respuesta a la temperatura, especialmente en los tres sitios ubicados a mayor altitud. Lo contrario ocurre con la función de respuesta a la humedad  $f_w$ , la cual disminuye en todos los sitios de estudio y esto se debe a la disminución estimada para el 2060 en 19.4 % de la precipitación.

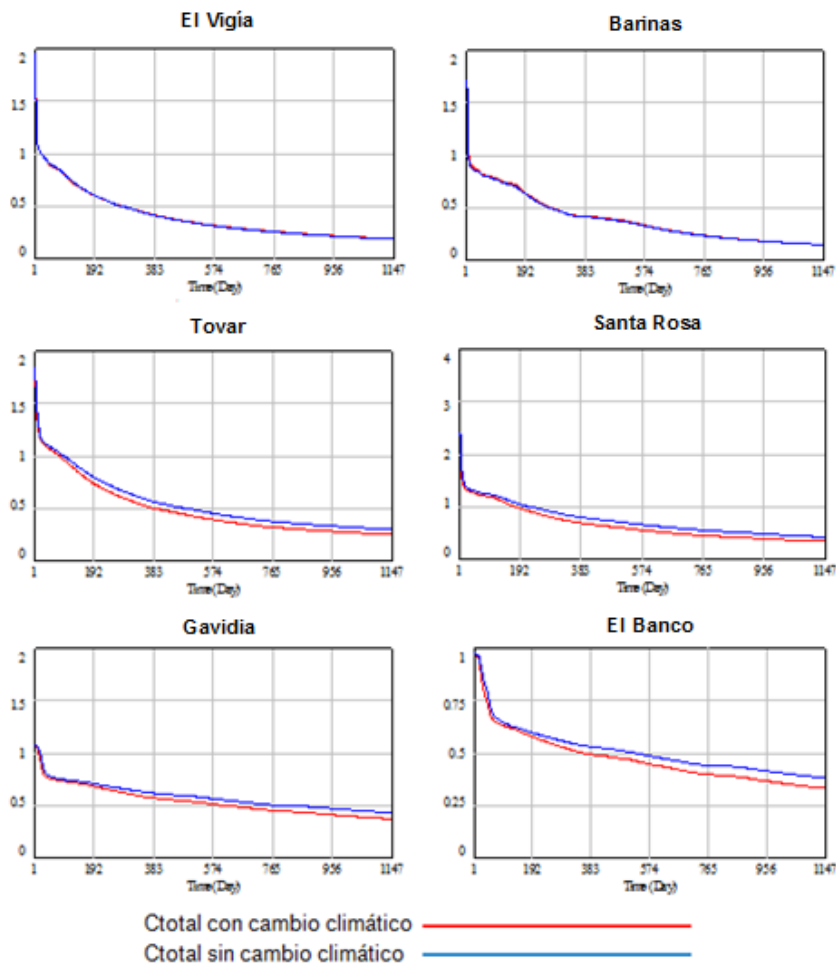
El efecto sobre  $f_w$  resulta algo más pronunciado para Barinas. Con respecto a la función de respuesta combinada  $f_t * f_w$  se observa que esta disminuye levemente para el Vigía y Barinas donde la disminución de la precipitación resulta más importante que el aumento de la temperatura sobre la función de respuesta combinada, mientras que para el resto de los sitios esta función de respuesta aumenta, predominando el efecto del aumento de la temperatura. Este resultado indicaría que el efecto del cambio climático sobre la descomposición sería más marcado en sitios de altitud que en los ecosistemas de zonas bajas. Luego, se realizó un primer ejercicio con el modelo MOMOS para dos escenarios posibles, uno sin cambio climático y otro con el cambio climático esperado para el año 2060, considerando la descomposición de la misma cantidad de paja marcada que fue utilizada en el experimento de campo, como se muestra en la figura 9.

En la figura 9, se aprecia que como era de esperarse, para El Vigía y Barinas el comportamiento es prácticamente el mismo, mientras que para Tovar, Santa Rosa, Gavidia y el Banco, se observa una disminución del carbono total en las condiciones de cambio climático. En un segundo ejercicio, se intentó evaluar el efecto de este cambio climático sobre la cantidad de materia orgánica total del suelo y no únicamente sobre la descomposición de la paja marcada como en el ejercicio anterior. Para esto, se asumió una entrada anual de necromasa al sistema, la cual fue calculada como la cantidad de paja de trigo necesaria para mantener los niveles de carbono total del suelo encontrados en cada sitio, como se muestra en el cuadro 7.

Sitios	$C_{total}$ del suelo (g C*kg <sup>-1</sup> )	Entrada anual estimada de necromasa (g C*kg <sup>-1</sup> )
El Vigía	29	26,8
Barinas	19,22	17,5
Tovar	43,40	34,8
Santa Rosa	115,19	63,3
Gavidia	95,00	38,5
El Banco	46,76	20,8

**CUADRO 7.** Valores de entrada anual de necromasa (paja de trigo) al suelo que serían necesarios para alcanzar una materia orgánica total del suelo equivalente a la encontrada en cada sitio suponiendo una situación de equilibrio.

Con estos valores de entradas anuales de necromasa para cada sitio de estudio y bajo el supuesto de que el cambio climático no afectaría la entrada de necromasa, se corrió el modelo MOMOS sin cambio climático inicializando los



**FIGURA 9.** Dinámica del carbono total después de incorporar una cantidad de necromasa al suelo igual a la utilizada en el experimento de campo en condiciones con cambio y sin cambio climático para cada sitio de estudio.

compartimientos con los valores en estado de equilibrio y luego se realizó el mismo ejercicio con cambio climático para obtener los valores promedios de los compartimientos luego de 64 años de simulación, como se muestra en el cuadro 8. No fue posible prolongar la simulación bajo el cambio climático hasta alcanzar un nuevo equilibrio debido a que el número de simulaciones que guarda el modelo en Vensim® es limitado.

El cuadro 8, muestra que para el Vigía se observan pérdidas de carbono de los compartimientos  $C_{BM}$  y  $C_{HL}$  con el cambio climático propuesto, mientras que los compartimientos  $HS$  y  $C_{total}$  aumentan muy levemente. Para Barinas el compartimiento del  $C_{BM}$  no presenta cambios y

en el resto de ellos aumenta el carbono pero muy levemente. Los aumentos en estos dos sitios se deben al efecto de la disminución de la precipitación, que disminuye un poco la función combinada de respuesta. Para Tovar, Santa Rosa, Gavidia y el Banco, se observa una disminución de carbono (Cuadro 9), la cual en términos absolutos resultaría mayor para Santa Rosa, donde se estarían liberando a la atmósfera 17,66 gramos de carbono por kilo de suelo, lo cual representa aproximadamente 18 toneladas de carbono por hectárea para los 10 primeros cm de suelo. Sin embargo el supuesto de que las entradas de necromasa se mantienen iguales y sólo varía su dinámica de descomposición es fuertemente cuestionable. De producirse



Sitios	Valores sin cambio climático en estado de equilibrio (g C kg <sup>-1</sup> )				Valores con cambio climático después de 64 años (g C kg <sup>-1</sup> )			
	C <sub>BM</sub>	C <sub>HL</sub>	C <sub>HS</sub>	C <sub>total</sub>	C <sub>BM</sub>	C <sub>HL</sub>	C <sub>HS</sub>	C <sub>total</sub>
El Vigía	0,38	3,77	20	29	0,37	3,73	20,84	29,83
Barinas	0,28	2,26	11,20	19,22	0,28	2,33	11,37	19,36
Tovar	0,72	5,65	29,1	43,40	0,63	5,15	25,83	38,02
Santa Rosa	1,77	14,56	74,20	115,19	1,53	12,90	64,40	97,53
Gavidia	1,26	9,51	53,97	95,00	1,17	9,20	52,09	85,70
El Banco	0,48	3,68	22,15	46,76	0,42	3,10	20,20	39,70

Sitios	BM (g C*kg <sup>-1</sup> )	HL (g C*kg <sup>-1</sup> )	HS (g C*kg <sup>-1</sup> )	C <sub>total</sub> (g C*kg <sup>-1</sup> )
El Vigía	-0,01 (-2,63)	-0,04(-1,06)	0,84(4,2)	0,83 (2,86)
Barinas	0	0,07(2,92)	0,17(1,52)	0,14 (0,73)
Tovar	-0,09(-12,5)	-0,50(-8,9)	-3,27(-11,24)	-5,38 (-12,4)
Santa Rosa	-0,25(-13,85)	-1,66(-11,4)	-9,8(-13,21)	-17,66 (-15,33)
Gavidia	-0,09(-7,29)	-0,31(-3,27)	-1,88(-3,48)	-9,3 (-9,79)
El Banco	-0,07(-14,25)	-0,59(-15,88)	-1,95(-8,8)	-7,06 (-15,1)

**CUADRO 8.** Tamaño de algunos compartimentos de carbono del suelo sin cambio climático y después de 64 años de cambio climático para los seis sitios considerando que la entrada de necromasa al suelo no se ve afectada por el cambio climático.

**CUADRO 9.** Cambio neto y porcentual en el tamaño de algunos compartimentos de carbono en el suelo luego de 64 años de simulación.

también una disminución en la producción vegetal y por ende en la cantidad de necromasa, la disminución del carbono en el suelo podría ser mayor.

#### 4. CONCLUSIONES

El modelo MOMOS, centrado en el funcionamiento de la biomasa microbiana, aplicado por primera vez a dos ecosistemas de alta montaña, puede ser usado como herramienta confiable de predicción de la dinámica de MOS en otros ambientes tropicales tanto de baja altitud como de montaña. El modelo MOMOS muestra que los procesos de descomposición no son principalmente controlados por el nivel de las poblaciones microbianas, sino por su cociente de respiración, las condiciones climáticas y las propiedades físicas del suelo (textura y pH), como principales impulsores de la dinámica de la MOS. Los resultados de la validación del

modelo MOMOS fueron aceptables. Sin embargo, la simulación sobre la dinámica de la BM no fue como se esperaba, debido a la existencia de un pico al inicio de la descomposición, el cual se produce debido al rápido consumo de la fracción lábil, la cual representa el 86% de la paja añadida.

Sin embargo, la ocurrencia y magnitud de este pico no se pudo verificar con los valores medidos en el experimento de campo para los cuatro sitios de menor altitud debido a que el pico simulado se produjo inmediatamente después de incorporar el material marcado al suelo y desapareció antes de efectuar la primera medición de campo que fue aproximadamente un mes después. En este sentido no podemos corroborar cual fue la dinámica real de los microorganismos durante este primer periodo de tiempo. Para los sitios de mayor altitud, el pico de biomasa microbiana simulado se prolonga más en el tiempo y está aún presente

en el momento de la primera medición, pero no se observa en los datos de campo. Esto indica que el mecanismo de crecimiento de la biomasa microbiana después de la adición de un substrato debe ser estudiado más en detalle y que posiblemente el modelo no lo esté simulando correctamente.

Se podría estudiar esta variable suprimiendo las primeras mediciones para tener un mejor ajuste de los valores simulados con los de campo, además de una mejor valoración de los estadísticos %RMSE y NS, sobre todo para Tovar, Gavidia y El Banco. Sin embargo, la posible falta de precisión en esta etapa inicial no pone en peligro a largo plazo la descripción del proceso, como lo demuestra esta simulación. Por otra parte se predijo correctamente el  $C_{total}$  en los seis sitios, con ajuste de un solo parámetro ( $k_{resp}$ ), el cual se relacionó con las propiedades del suelo (textura y pH), lo cual permite afirmar que el modelo fue validado exitosamente en seis sitios muy contrastantes climáticamente.

Con la simulación de la respuesta de la MOS a escenarios de cambio climático en Venezuela, el modelo MOMOS predijo el secuestro de carbono en seis ambientes contrastantes. Al aumentar 4,5°C en la temperatura del aire y disminuir 19,4% en la precipitación diaria, se observó una ligera disminución de la biomasa microbiana, una disminución del carbono total del sistema y un aumento en la función de respuesta al clima para algunos de los sitios de estudio. Además se observó que ante una entrada anual de necromasa constante al sistema, en un escenario con el cambio climático propuesto, los valores de los principales compartimientos ( $C_{BM}$ ,  $C_{HL}$  y  $C_{HS}$ ) más la variable carbono total, disminuyen en la mayoría de los sitios de estudio. A largo plazo el carbono del suelo, de mantenerse las entradas invariables, se vería mucho más afectado (disminuiría más) en los sistemas de mayor altitud y se vería menos afectado en los sitios bajos, ya que la temperatura ya está muy cerca del óptimo en estos sitios.

Sin embargo, el supuesto de que las entradas de necromasa al sistema se mantendrían invariables bajo un escenario de cambio climático es muy cuestionable y para hacer mejores predicciones, un modelo como MOMOS debe ser acoplado con un modelo de producción vegetal, para poder simular de forma más completa e integrada, el posible efecto del cambio climático global.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALA, R. 2000. Seminario sobre composición isotópica. Universidad de Málaga. Málaga, España. En línea: <http://externos.uma.es/geml/isotopos.ppt>. [Consultado: 15/08/2006].
- ABLAN, M. 2007. *Simulador de lluvia markoviano*. [Documento no publicado]. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 137 p.
- ANDRIULO, A. 2006. Evolución del contenido de materia orgánica en suelos bajo agricultura continua: análisis y modelización. En línea: [http://www.engormix.com/evolucion\\_contenido\\_materia\\_organica\\_s\\_articulos\\_1089\\_AGR.htm](http://www.engormix.com/evolucion_contenido_materia_organica_s_articulos_1089_AGR.htm). [Consultado: 15/01/2009].
- COÛTEAUX, M., L. SARMIENTO, P. BOTTNER, D. ACEVEDO y T. THIÉRY. 2001. Decomposition of standard plant material along an altitudinal transect (65-3968m) in the tropical Andes. *Soil Biology & Biochemistry* 34: 69-78.
- HERRERA, M., J. del VALLE y S. ORREGO. 2001. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. En línea: [http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio\\_carbono/28\\_Herrera.PDF](http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/28_Herrera.PDF). [Consultado: 16/03/2006].
- IPCC. 2000. Informe especial del IPCC: Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. En línea: <http://www.grida.no/climate/ipcc/spmpdf/srl-s.pdf>. [Consultado: 19/01/2007].
- JULCA, A., L. MENESES, R. BLAS y S. BELLO. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. En línea: <http://>

[www.scielo.cl/pdf/idesia/v24n1/art09.pdf](http://www.scielo.cl/pdf/idesia/v24n1/art09.pdf).

[Consultado: 03/03/2006].

- LAVELLE, P., y A. SPAIN. 2005. *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers. Washington DC. USA. 220 p.
- MARTELO, M. 2003. Metodología para la selección de modelos de circulación general de la atmósfera y escenarios climáticos a incluir en la Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana* 48: 1-12.
- MARTELO, M. 2004. Consecuencias ambientales generales del cambio climático en Venezuela. En línea: <http://www.ciens.ucv.ve:8080/generador/sites/Ecologia%20General%20/archivos/Cambios%20climaticos.pdf>. [Consultado: 16/09/2008].
- MARTÓN, J. 2008. *Calentamiento global. Al borde del Límite N°8*. Instituto de Estudios Transnacionales (INET). Córdoba, España. 95 p.
- METSELAAR, K. 2003. Le bilanhydrique de la parcelle (modèle SAHEL). Proyecto Tropandes. En línea: <http://netx.u-paris10.fr/nss/atelier6.htm>. [Consultado: 04/10/2008].
- PANSU, M., P. BOTTNER, L. SARMIENTO y K. METSELAAR. 2004. Comparison of five soil organic matter decomposition models using data from a <sup>14</sup>C and <sup>15</sup>N labeling field experiment. *Global Biogeochemical Cycles* 18: 1-11.
- PANSU, M., L. SARMIENTO, K. METSELAAR, D. HERVÉ y P. BOTTNER. 2006. Modelling the transformations and sequestration of soil organic matter in two contrasting ecosystems of the Andes. *European Journal of Soil Science* 58: 775-785.
- PENNING de VRIES, F., D. JANSEN, H. TEN BERGE, y A. BAKEMA. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *Agricultural Systems* 36: 244-261.
- WOOMER, P., y M. SWIFT. 1994. *The biological management of tropical soil fertility*. John Wiley & Sons. Chichester. London, England. 106 p.