



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE BIOLOGÍA

**CAMBIOS EN EL CARBONO DEL SUELO LUEGO DE LA  
AFORESTACIÓN CON *Acacia mangium*, EN UNA SABANA  
VENEZOLANA.**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO  
Presentado ante la Ilustre Universidad  
Central de Venezuela, por la bachiller  
Lenny O. Romero F. como requisito  
parcial para optar por el título  
de Licenciada en Biología

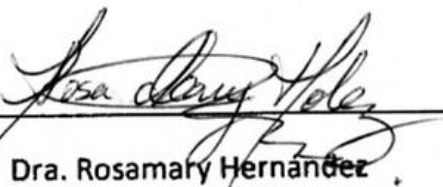
Tutor: Dr. Ismael Hernández-Valencia

CARACAS, VENEZUELA  
SEPTIEMBRE, 2010

## ACTA

Quienes suscribimos, miembros del jurado evaluador designado por el Consejo de la Escuela de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo Especial de Grado de la **Br. LENNY OSCARINA ROMERO FERNÁNDEZ C.I. 16564162**, titulado **“CAMBIOS EN EL CARBONO DEL SUELO LUEGO DE LA AFORESTACIÓN CON *Acacia mangium*, EN UNA SABANA VENEZOLANA”**, para optar por el título de Licenciada en Biología, considerando que dicho trabajo cumple con los requisitos exigidos en los reglamentos respectivos, lo consideramos **APROBADO**.

Para dar fe de ello se levanta la presente acta en la ciudad de Caracas a los treinta días del mes de abril de dos mil diez.



Dra. Rosamary Hernández

(Jurado)



Dr. Alonso David Ojeda

(Jurado)



Dr. Ismael Hernández

(Tutor)

*A quien me dio el aliento: Dios*

*A quien guió mi vida: Mamá y Papá*

*A ti, la irremplazable: Abuelita*

*Al que escucha mis fenómenos: Hermano*

*A quien ama mi nariz: Juan-Amoroso*

*A quien venció las sombras: la UCV*

## AGRADECIMIENTOS

---

Al final de este camino quiero agradecer a aquellos que dejaron huellas invaluable en mí: **Izaskun Petralanda**, por ser la primera luz de ética y responsabilidad de mi formación en biología, de ti aprendí que la ciencia es más que conocimiento y que la ética no son normas es una forma de vida. **Jorge Pérez**, quien me contagió de su confianza en la ciencia y dedicación a la enseñanza, y se ganó con creces toda mi confianza y cariño. **Ismael Hernández**, quien además de ser mi tutor, confió en mí como no me lo esperaba y me brindó su consejo amigo cuando lo necesitaba. **Ernesto González**, sin igual en diligencia y camaradería, ¡¡que bárbaro!!, lo cuidadosa que procuro ser en un laboratorio inició con su insistencia en mostrarnos la consecuencias de nuestros descuidos. **Zaida Táran**, quien en poco tiempo ganó mi estima y fue generosa con consejos y buenos ejemplos. A **Lourdes Suarez, Maria Beatríz Barreto y Eduardo Barreto**, por mostrarme lo divertido que es perder los zapatos en un manglar y tomar coca-cola al final de la jornada. Al **Consejo de Escuela de Biología**, donde aprendí a defender mis ideas y me reconocí como estudiante. A las “secres” de la Escuela: **Estrellita, Marisol, Betty y Lorena**, por recordar mi nombre entre miles de rostros y brindarme siempre una sonrisa. Al **Laboratorio de Ecología**, donde me enamoré de la docencia, caí, me levanté, reí y me formé. A la **UCV**, por hacer mi sueño realidad. A **Caño Guayabo en La Azulita**, quien me brindó su verde para concentrarme en tantos datos. A mi compañero de sueños, **Juan Carlos Rodríguez**, vaya que hemos recorrido largas veredas. A mis amigos de siempre: **Cesar Serrano**, el mejor amigo ever, **Lesbia Rodríguez**, la que nunca desapareció, **Luis Hernández**, al que convertí en ecólogo, **Maria Angelica Pérez**, la amiga médico de la familia y **Amliz Danilow** por hacer de una tradición las recientes parchiriñas.

Gracias a la colaboración prestada por **PDVSA Petropiar**, quienes amablemente nos brindaron la asistencia necesaria para llevar a cabo la toma de muestra de este trabajo, en especial al señor **Ismael**, trabajador de la empresa quien atentamente nos acompañó en todas las jornadas. Al **Laboratorio de Estudios Ambientales** del IZET por el gentil apoyo técnico prestado, al **Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía** en Maracay y a “mi laboratorio casa” el **Laboratorio de Ecología del Paisaje y Agroecología**, donde pasé grandes horas escuchando hablar las muestras y amenizando la velada con buena música.

*¡Estoy feliz de contarlos en mi haber!*

## INDICE DE CONTENIDO

---

	<b>Página</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Índice de contenido</b> .....	v
<b>Índice de figuras</b> .....	ix
<b>Índice de tablas</b> .....	xii
<b>Abreviaturas</b> .....	xiv
<b>Resumen</b> .....	1
<b>Introducción</b> .....	3
<b>Marco Teórico</b> .....	
De los cambios en el ciclo del carbono: desencadenantes y consecuencias .....	7
Los sistemas biológicos terrestres como secuestradores de carbono .....	10
El suelo como sumidero de carbono.....	11
- La materia orgánica del suelo .....	14
Monitoreando el destino del carbono en el suelo .....	17
<b>Antecedentes</b> .....	19
<b>Hipótesis y objetivos</b> .....	24
<b>Área de estudio</b> .....	25
<i>Acacia mangium</i> .....	28

<b>Métodos</b> .....	
Metodología de Campo .....	30
Metodología de Laboratorio .....	32
Composición de las muestras e identificación de horizontes .....	32
Caracterización física y química de los horizontes del suelo .....	32
- Análisis textural .....	32
- Densidad aparente .....	32
- Capacidad de campo .....	33
- Determinación de pH .....	33
- Nitrógeno total del suelo y la hojarasca .....	34
- Fósforo disponible del suelo .....	34
- Capacidad de intercambio cationico efectiva, cationes intercambiables y porcentaje de saturación de bases .....	35
Análisis químico de los indicadores de cambio en la cantidad y dinámica del carbono .....	
- Fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo .....	35
- Carbono orgánico total del suelo y la hojarasca .....	35
- Carbono de la FL y la FP de la MOS .....	36
- Materia orgánica del suelo .....	36
- Respiración basal .....	36
- Contenido de carbono soluble .....	37
- Contenido de carbono microbiano .....	37

- Coeficientes metabólicos .....	38
Análisis estadístico .....	39
<b>Resultados y Discusión</b> .....	
Caracterización física y química de los horizontes del suelo .....	40
Textura .....	40
Densidad aparente .....	41
Capacidad de campo y humedad del suelo .....	43
pH.....	44
Nitrógeno total y fósforo disponible .....	46
Capacidad de intercambio catiónico efectiva, cationes intercambiables y porcentaje de saturación de bases.....	49
Indicadores del cambio en la dinámica y cantidad de carbono .....	52
Hojarasca .....	52
Fracción ligera y fracción pesada del suelo .....	53
Materia orgánica .....	54
Carbono del suelo.....	56
- Carbono orgánico total .....	57
- Carbono de la fracción ligera y pesada del suelo.....	58
- Carbono Soluble .....	60
- Carbono microbiano .....	61
Relación C/N del suelo .....	63

Respiración edáfica .....	65
Respiración basal .....	66
Coefficiente metabólico .....	69
Contribución de las diferentes formas de carbono al carbono total del suelo .....	71
Efecto de la aforestación con <i>Acacia mangium</i> sobre las propiedades del suelo de la sabana .....	73
Cambios en la cantidad y dinámica del carbono del suelo .....	76
Cambios en la fertilidad del suelo .....	78
Consideraciones sobre la aforestación con <i>Acacia mangium</i> y creación de sumideros de carbono .....	79
<b>Conclusiones</b> .....	<b>84</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>86</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>91</b>



## INDICE DE FIGURAS

---

- Figura 1.** Ciclo global del carbono en la actualidad. Los almacenes están expresados en Pg C (números en negro) y los flujos en Pg C/año (número en azul).....pag. 8
- Figura 2.** Diagrama esquemático mostrando los procesos que controlan el almacenamiento de carbono en el suelo.....pag. 11
- Figura 3.** Componentes de la materia orgánica ó carbono terrestre. C: carbono, COS: carbono orgánico del suelo, CIS: carbono inorgánico del suelo, FL: fracción ligera, FI: fracción intermedia, FP: fracción pasiva.....pag. 15
- Figura 4.** Ubicación del área de estudio. En las afueras de la ciudad de El Tigre, Edo. Anzoátegui se encuentran las instalaciones de PDVSA Petropiar. Se muestra croquis de ubicación relativa del bosque de *Acacia mangium* y la sabana de estudio.....pag. 26
- Figura 5.** Climadiagrama de Gaussen para la zona de estudio: El Tigre, Edo. Anzoátegui.....pag. 28
- Figura 6.** A: Rodal de *Acacia mangium* en El Tigre, Edo Anzoátegui. La fotografía fue tomada en el área donde fueron tomadas las muestras para éste trabajo. B: Detalle de hojarasca, semillas y hongo creciendo en la parcela de *A. mangium*. C: Detalle de las hojas verdes de *A. mangium*.....pag. 29
- Figura 7.** Esquema que ilustra las profundidades de los estratos (E1, E3 y E3) identificados en campo para cada zona de muestreo (Sabana y Bosque).....pag. 31
- Figura 8.** Esquemización del diseño de muestreo. Los círculos indican los puntos elegidos al azar en cada zona, en parcelas de 50x200m. ....pag. 31

**Figura 9.** Densidad aparente en  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  del suelo bajo vegetación de sabana y bajo vegetación boscosa de *A. mangium*.....pag. 42

**Figura 10.** Capacidad de campo (CC) y porcentaje de humedad del suelo bajo vegetación de sabana y del suelo bajo vegetación boscosa de acacia.....pag. 44

**Figura 11.** Nitrógeno total (Nt) y fósforo disponible (Pdis) del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de *A. mangium*.....pag. 47

**Figura 12.** Carbono en la biomasa, contenido de nitrógeno (%) y relación C/N del la hojarasca de la vegetación de sabana y de la vegetación boscosa de *A. mangium*.....pag. 53

**Figura 13.** Fracciones del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de *A. mangium*. FP: fracción pesada, FL: Fracción ligera. ....pag. 54

**Figura 14.** Contenido de materia orgánica del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de *A. mangium*.....pag. 55

**Figura 15.** Carbono total (CT), carbono de la fracción pesada (CFP) y carbono de la fracción ligera (CFL) del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de *A. mangium*.....pag. 60

**Figura 16.** Carbono soluble (Csol) y carbono microbiano (Cmic) del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de acacia.....pag. 62

**Figura 17.** Efecto de los valores de relación C/N del material orgánico sobre los procesos de mineralización o inmovilización.....pag. 64

**Figura 18.** Respiración edáfica (RE) del suelo bajo vegetación de la sabana y del suelo bajo vegetación del bosque de acacia.....pag. 66

**Figura 19.** Respiración basal (RE) del suelo bajo vegetación de la sabana y del suelo bajo vegetación del bosque de acacia. A) miligramos de CO<sub>2</sub> acumulados durante los 120 días de medición. B) tasa de producción de CO<sub>2</sub> durante los 120 días de medición.....pag. 68

**Figura 20.** Proporción de las diferentes formas de carbono estimadas para la sabana y para el bosque de *A. mangium*.....pag. 72

**Figura 21.** Análisis de ordenación por componentes principales. Las proyecciones se encuentran sobre el plano del primer y segundo componente principal (factor 1 y 2).....pag. 81

### **Figuras anexas**

**Figura A1.** Vista general de las zonas estudiadas.....pag. 91

**Figura A2.** Vista general de la sabana estudiada.....pag. 92

**Figura A3.** Vista panorámica del bosque de *Acacia mangium* estudiado.....pag. 92

**Figura A4.** Detalle del suelo en el bosque de *A. mangium*. A) vista desde arriba del suelo. Se observa hojarasca, semillas y la estructura de hongo. B) detalle del cuerpo fructífero del hongo. ....pag 93

**Figura A5.** Ejemplar de escorpión observado en el bosque de *A. mangium*.....pag. 94

## INDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Gases de Efecto Invernadero (GEI) y su situación en la atmósfera desde la revolución industrial en 1750.....	pag. 9
<b>Tabla 2.</b> Existencia de carbono por hectárea (toneladas de C·ha <sup>-1</sup> ) por región y subregión mundial, para el año 2005.....	pag. 13
<b>Tabla 3.</b> Estimación de las cantidades de carbono orgánico almacenado en suelos de bosques y sabanas.....	pag. 13
<b>Tabla 4.</b> Compartimientos orgánicos dinámicos de la materia orgánica del suelo, composición y tiempo de recambio en años (Modificado de <b>Parton y col., 1987</b> ).....	pag. 16
<b>Tabla 5.</b> Porcentajes de arena, arcilla y limo promedio para cada estrato del suelo de la sabana (S) y del suelo del bosque de <i>A. mangium</i> (B).....	pag. 41
<b>Tabla 6.</b> pH del suelo bajo vegetación de sabana y bajo vegetación boscosa de <i>A. mangium</i> , determinado en agua a una relación 1:2,5.....	pag. 45
<b>Tabla 7.</b> Valores de nitrógeno promedios para suelos bajo vegetación de <i>Trachypogon sp.</i> y suelos bajo vegetación de <i>A. mangium</i> .....	pag. 48
<b>Tabla 8.</b> Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), cationes intercambiables y porcentaje de saturación de base para los horizontes bajo vegetación de sabana y bajo vegetación boscosa de <i>A. mangium</i> .....	pag. 51
<b>Tabla 9.</b> Cambios en el carbono total (CT) del suelo del bosque de <i>A. mangium</i> (B) respecto al suelo de la sabana (S).....	pag. 58

**Tabla 10.** Carbono fijado por la vegetación de la tierra como productividad primaria neta (PPN), pool de carbono (C) incluyendo el contenido en la vegetación y en el suelo, y tasa promedio de acumulación de C en el suelo para los principales biomas del mundo.....pag. 58

**Tabla 11.** Relación carbono-nitrógeno (C/N) del suelo bajo vegetación de sabana y bajo vegetación de bosque de acacia.....pag. 64

**Tabla 12.** Respiración basal (RB) promedio y coeficiente metabólico ( $qCO_2$ ) de los horizontes bajo vegetación de sabana y bajo vegetación boscosa de *A. mangium*.....pag. 70

**Tabla 13.** Variación absoluta y relativa de los diferentes parámetros estimados como indicadores del cambio en la dinámica y cantidad de carbono en el suelo de la sabana aforestada.....pag. 75

#### **Tablas anexas**

**Tabla A1.** Correlación por estrato, entre algunas de las variables estudiadas en la sabana y el bosque de *A. mangium*.....pag. 95

## ABREVIATURAS

---

aprox	aproximadamente	MOS	materia orgánica del suelo
B	bosque	M-W	Man Whitney U test.
C	carbono	N	nitrógeno
C/N	relación carbono:nitrógeno	n <sub>B</sub>	número de muestras en el bosque
CC	capacidad de campo	n <sub>S</sub>	número de muestras en la sabana
CFL	carbono de la fracción ligera	P	fósforo
CFP	carbono de la fracción pesada	p	probabilidad
CIC	capacidad de intercambio cationico	Pg	petagramos
Cmic	carbono microbiano	RB	respiración basal
CO	carbono orgánico	RE	respiración edáfica
Csol	carbono soluble	S	sabana
CT	carbono total	SB	porcentaje de saturación de bases
Da	densidad aparente	ton	toneladas
DE	desviación estándar		
E	estrato		
ES	error estándar		
FL	fracción ligera		
FP	fracción pesada		
GEI	gases de efecto invernadero		
ha	hectárea		
K-W	Kruskal Wallis		
mg	miligramos		

## RESUMEN

---

Con la finalidad de incrementar las tasas de circulación del CO<sub>2</sub> desde la atmósfera hasta los sumideros terrestres, en el protocolo de Kyoto se sugieren tres líneas estratégicas de mitigación: 1) Incremento y mantenimiento de los niveles de carbono en los sistemas terrestres, mediante el manejo de tierras, la fertilización y evasión de la degradación, 2) Incremento de las cantidades de carbono en áreas bajo agricultura, con la creación de sistemas agroforestales y 3) Mantenimiento e incremento de las áreas boscosas, empleando técnicas de reforestación y aforestación. El presente trabajo constituye una evaluación a la puesta en práctica de la aforestación como estrategia para la creación de nuevos sumideros de carbono y aumento del potencial de secuestro de carbono en sabanas venezolanas.

En el Edo. Anzoátegui, la empresa Petropiar inició ensayos pilotos de bosques compensatorios de CO<sub>2</sub> con el árbol leguminosa de origen australiano, *Acacia mangium*. El establecimiento de esta especie se ha hecho en áreas de sabanas de *Trachypogon spicatus* y *Aristida longifolia*. Con el objetivo de determinar si las plantaciones de *A. mangium* han incrementado las cantidades de carbono presentes en un suelo de sabana, se evaluó la contribución de las fracciones de la materia orgánica del suelo al carbono total, la variación en la actividad metabólica de los suelos y la profundidad a la cual se registran cambios. Para ello se contrastó una sabana de *T. spicatus* con un rodal de *A. mangium* de 10 años de edad, ubicados adyacentes y separados entre sí unos 200m. Se identificaron en cada zona tres estratos en el perfil del suelo (E1, E2 y E3) correspondientes a horizontes A, Bt1 y Bt2 de un Haplustox. Se tomaron 6 muestras compuestas en cada horizonte, para un total de 36 muestras (18 muestras por zona).

Se encontró un aumento promedio de 43,01% del CT en el bosque correspondiente a una diferencia neta de 0,22 tonCO<sub>2</sub>-Kg<sup>-1</sup>·ha<sup>-1</sup>. Así mismo la cantidad de MOS presentó un promedio general (media ±ES) para el bosque de 3,60 ±0,34% y para la sabana de 2,60 ±0,41%, lo que representa un aumento de 38,46%. La biomasa de hojarasca en el bosque superó en un 763,95% a la de la sabana (214,75g·m<sup>-2</sup> y 1855,34 g·m<sup>-2</sup>, respectivamente).

En cuanto a la contribución de las diferentes formas del carbono al CT se encontró que el Cmic presentó la mayor variación, con un 163,84%, seguido del CFP con un 50,39% de variación siendo mayor en el bosque, mientras que las diferencias encontradas entre tipos de vegetación en el CFL y el Csol, no fueron significativas. El flujo de CO<sub>2</sub> medido como RE resultó mayor para la sabana (183,05 mgCO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) situando al bosque como menor emisor de este gas con efecto invernadero (123 mgCO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>). La contribución del metabolismo microbiano a este hecho fue descartada al no encontrar diferencias significativas entre la RB de las zonas. Por su parte, el qCO<sub>2</sub> fue menor para el bosque sugiriendo mayor eficiencia en la mineralización del carbono y menores condiciones de estrés para los microorganismos.

Los cambios a nivel nutricional se registraron en la concentración de N (0,02%) equivalente a un aumento del 39,27% en el bosque, y Pdis (1,32 µg·g<sup>-1</sup>) el cual es menor en el bosque en un 65,25%. De los parámetros físicos, el cambio más importante fue en el pH, con una disminución promedio de 0,60 unidades en el bosque (de 4,46 en la sabana a 3,86 en el bosque).

De los resultados se extrae que la aforestación con *Acacia mangium* ha significado el aumento del potencial del secuestro de carbono, favoreciéndose a su vez la biomasa microbiana y el enriquecimiento de los suelos con nitrógeno, producto de la interacción simbiótica de esta leguminosa. Estos cambios han ocurrido sin que ello suponga un aumento en la emisión de CO<sub>2</sub> del suelo y sugieren una mayor diferenciación entre la sabana y el bosque en comparación a la última evaluación hecha al rodal en el 2006 por Petropiar. Por otra parte, la disminución del pH y el aumento de la materia orgánica sugieren limitaciones en la disponibilidad de nutrientes, en especial del fósforo. Finalmente, los valores de MOS, CT y biomasa de la hojarasca presentados por la sabana testigo son superiores a la mayoría de las sabanas de *Trachypogon sp*, en Venezuela, lo que sugiere que con la protección del fuego de estas sabanas, puede también aumentar su potencial de secuestro de carbono.

**Palabras claves:** aforestación, sabanas, *Acacia mangium*, carbono del suelo, fracciones de la materia orgánica.



## INTRODUCCIÓN

---

La creciente preocupación por el aumento de las cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera y su efecto sobre el clima mundial, ha impulsado la búsqueda de estrategias que permitan disminuir las tasas de emisión de este gas y otros con efecto invernadero, así como reducir la concentración actual de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. En este sentido se ha puesto especial atención en el potencial de los sistemas biológicos terrestres para secuestrar carbono. El término “secuestro de carbono” se ha empleado para expresar la retención o acumulación temporal del CO<sub>2</sub> proveniente de la atmósfera, en forma de materia orgánica en el suelo (**Roberts, 2000; Albrecht y Kandji, 2003; Lal, 2004**). Éste secuestro ocurre cuando el carbono en forma de CO<sub>2</sub> es tomado de la atmósfera por las plantas y transformado en productos orgánicos (hidratos de carbono), liberando oxígeno durante el proceso de fotosíntesis. Los animales y las plantas utilizan los hidratos de carbono en el proceso de respiración, liberándose CO<sub>2</sub> a la atmósfera y energía. El carbono fijado en los tejidos vivos y almacenado en los reservorios terrestres retorna a la atmósfera durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El tiempo de permanencia del carbono almacenado en los reservorios, dependerá de las características del material orgánico y de las condiciones bióticas, físicas y químicas del entorno, las cuales actúan sobre la velocidad de los procesos de descomposición.

Los ecosistemas difieren en su potencial para secuestrar carbono. Estas diferencias se hacen evidentes en:

- 1) El tipo de vegetación presente: la cual define las particularidades en el mecanismo fotosintético, la relación de carbohidratos estructurales y no estructurales, el aporte de material vegetal al suelo y la composición estructural de los residuos vegetales.
- 2) Condiciones fisicoquímicas: estas se refieren a las características promedio de la atmósfera y del suelo lo cual determinan en gran medida, la capacidad del sistema para mineralizar y estabilizar la materia orgánica. El microclima juega un papel importante en la modulación de parámetros como humedad,

régimen de precipitación y temperatura, que a su vez repercuten en la disponibilidad de nutrientes, compactación, erosión y estructura del suelo.

- 3) Microorganismos del suelo: los cuales están a cargo de los procesos de descomposición de los residuos vegetales y del reciclaje de nutrientes de los sistemas. Además, constituyen un reservorio dinámico de carbono y nutrientes.

La vegetación y el suelo son los principales compartimientos de almacenamiento de carbono en los sistemas terrestres. La rapidez con que el carbono es almacenado en la vegetación se mide cuantificando la productividad primaria neta, la cual dependerá básicamente de las características fisiológicas de las especies vegetales presentes, así como de las características del suelo y las condiciones climáticas. Generalmente las tasas de fijación de CO<sub>2</sub> son mayores que las tasas de acumulación de carbono en el suelo; sin embargo, las cantidades absolutas de carbono encontradas en los suelos a nivel mundial son más importantes que las reportadas para la vegetación global (**McVay y Rice, 2002; Fernández, 2004; FRA, 2005**). Ello frecuentemente es atribuido al mayor tiempo de residencia del carbono en el suelo.

Cuando se considera el secuestro de carbono en relación a los tipos de biomas, frecuentemente se resalta la importancia de los bosques tropicales debido a la mayor cantidad de biomasa en pie que presentan. Sin embargo, recientemente se ha empezado a ponderar el tamaño del área que ocupan los diversos biomas del mundo respecto a su contribución al pool de carbono global, así como las presiones naturales y antrópicas a las cuales están sometidos. Con base en esto, se reconoce la importancia de las sabanas y pastizales, no solo por las grandes extensiones que ocupan, sino también por el impacto que el cambio en el uso de la tierra, la ganadería y la quema tienen sobre las tasas de acumulación y pérdida de carbono (**Rondón y col., 2006**). De hecho, la tasa de pérdida de carbono en las sabanas tropicales, por quema y pastoreo, excede el 1% anual, lo cual es aproximadamente el doble de la tasa de pérdida reportada para los bosques lluviosos (**Grace y col., 2006**). Las alternativas para aumentar la capacidad de secuestro de carbono en las sabanas sugieren cambios en el manejo actual de las mismas, que van desde la sustitución de la labranza convencional por la siembra directa, la

protección contra la quema, la sustitución de sistemas de cultivo por sistemas agroforestales, hasta la completa transformación de la sabana a un sistema forestal.

En Venezuela, a mediados de los años 1960 se comenzaron a implementar programas gubernamentales de introducción a gran escala de plantaciones forestales en Los Llanos, principalmente con fines comerciales (*Pinus caribbea*, *Eucalyptus deglupta*), y de pastos no nativos como el arroz (*Oryza sativa*) y el algodón (*Gossypium hirsutum*) (Campos, 1999; Berroterán, 2004; Rondón y col, 2006). La introducción de grandes extensiones de pinos en ecosistemas de sabana ha generado cambios en las características fisicoquímicas del suelo, la fauna asociada a la vegetación y la mineralización de nutrientes y carbono proveniente de los residuos orgánicos de estas plantaciones (Campos, 1999), lo que se ha traducido en un cambio gradual de la funcionalidad del ecosistema. Sin embargo, la relevancia de esto último puede variar dependiendo del objetivo bajo el cual se estudie. Por una parte la fertilidad de los suelos de sabana disminuye con las plantaciones forestales aunado a la disminución de la biodiversidad por la implantación de un monocultivo, que en el caso de eucalipto y pino es agravado por su efecto alelopático sobre otras especies (González y col. 1992; Cecon y Martínez-Ramos, 1999; Jiménez y col. 2006). Por otra parte, la composición de los residuos vegetales de estas plantaciones, presentan sustancias de lenta degradación como celulosa, terpenos, hemicelulosa y lignina, lo cual favorece el secuestro de carbono, ya que aumenta el tiempo de permanencia de la materia orgánica en el suelo (Villarreal, 1993).

Dado que mantener la fertilidad del suelo, la biodiversidad y promover el secuestro de carbono son objetivos igualmente relevantes, el uso de especies arbóreas leguminosas como *Acacia mangium* parece ser una solución a la pérdida de fertilidad de los suelos sin sacrificar el potencial secuestro de carbono. *A. mangium*, de origen australiano, ha sido reportada como una especie capaz de rehabilitar suelos degradados, restaurar la fertilidad y biodiversidad del suelo, reducir el riesgo por plagas, facilitar el establecimiento de especies vegetales no tolerantes a las altas temperaturas y promover el secuestro de carbono (Resh y col., 2002; Garay y col., 2004; Kelty, 2006; Macedo y col., 2008; Yang y col., 2009). Estos beneficios se atribuyen en parte a su asociación

con organismos fijadores de nitrógeno lo que le permite un rápido crecimiento y alta acumulación de materia orgánica. Desde el año 1999 la industria petrolera venezolana, en concordancia con su política ambiental ha venido desarrollando planes de aforestación (transformación de un sistema no boscoso a un sistema forestal) en el área de influencia de sus actividades de producción, esto con el fin de crear bosques de compensación de CO<sub>2</sub> que permitan compensar la emisión de este gas por sus actividades industriales. *A. mangium* se ha utilizado como especie piloto en este propósito.

En el presente trabajo se evaluaron los cambios en el contenido de carbono del suelo producto de la sustitución de una sabana de *Trachypogon spicatus* por un sistema forestal dominado por *Acacia mangium*. En este sentido, se consideraron no solo las cantidades totales de carbono en el suelo, sino también el cambio del compartimiento lábil del carbono (carbono soluble y carbono microbiano), de las fracciones de la materia orgánica (ligera y pesada) y de la actividad microbiana (respiración edáfica y basal) como indicadores de los procesos de descomposición y emisión de CO<sub>2</sub> del suelo.

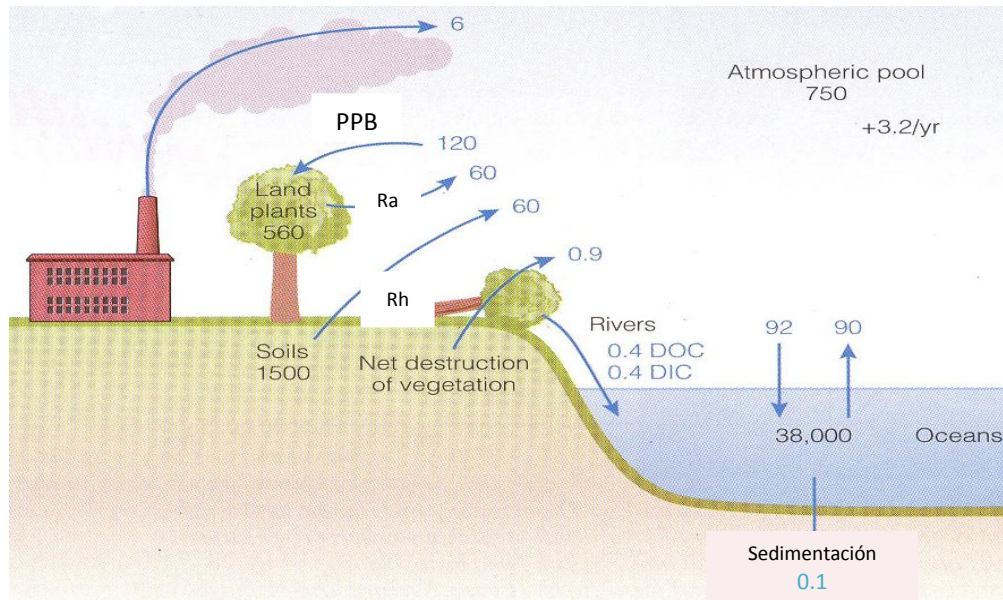
## MARCO TEÓRICO

---

### De los cambios en el ciclo del carbono: desencadenantes y consecuencias

El ciclo del carbono se puede entender como la integración de dos ciclos a escala temporal diferente: un ciclo lento o geológico (de millones de años), el cual contempla el ingreso del carbono a partir de la actividad volcánica, la mineralización de la roca caliza, los depósitos de combustible fósil, entre otras; y un ciclo rápido o biológico (de décadas o poco más) que involucra la circulación del carbono a través de los seres vivos. Con la revolución industrial, el balance natural de carbono entre la atmósfera, los océanos y los ecosistemas terrestres se ha alterado, como consecuencia de la entrada acelerada del carbono almacenado en la litósfera, liberado por la utilización del combustible fósil en actividades humanas (**Ricklefs y Miller, 2000**). Esta nueva entrada ha generado el aumento de las cantidades de CO<sub>2</sub> presentes en la atmósfera de manera tal que no son compensados por los sumideros o reservorios naturales existentes (Fig. 1).

Además de la quema de combustible fósil, otra de las principales fuentes antrópicas de CO<sub>2</sub> es la relativa al uso de la tierra, especialmente la deforestación de los bosques tropicales y los incendios forestales (**Roberts, 2000**). Las pérdidas por deforestación y las prácticas de una agricultura intensiva, en donde se prioriza la maximización del rendimiento, puede ir en detrimento del almacenamiento de carbono en la mayoría de los compartimientos del suelo (**San José y Montes, 2003; Grace y col., 2006**). Entre 1990 y 2005, la región de América Latina y el Caribe perdió casi 64 millones de hectáreas de bosque, un 7% de su superficie boscosa (**FAO, 2009**). En el caso de Venezuela, entre 1950 y 1975 desapareció un 32,5% de la cobertura boscosa de la región de los llanos y entre 1975 y 1988 desapareció un 45% adicional (**Berroterán, 2004**). Las pérdidas de áreas boscosas se han vinculado con el crecimiento de la demanda alimenticia en el mundo, lo cual conlleva a la sustitución de bosques por sistemas de cultivo o ganaderos. A esta situación se suma la extracción maderera con fines de construcción, elaboración de papel, entre otras.



**Figura 1.** Ciclo global del carbono en la actualidad. Los almacenes están expresados en Pg C (números en negro) y los flujos en Pg C·año<sup>-1</sup> (número en azul). Note que las salidas no están balanceadas con las entradas de carbono al ciclo. 1Pg= 10<sup>15</sup>g. PPB = producción primaria bruta; Ra = respiración autótrofa; Rh = respiración heterótrofa; DOC = carbono orgánico disuelto; DI = carbono inorgánico disuelto (modificado de Schlesinger 1997, y actualizado con información de IPCC, 2007).

En principio, las alteraciones en los patrones climáticos globales han sido atribuidas al aumento en la concentración atmosférica de los gases con efecto invernadero (GEI), desde el comienzo de la revolución industrial en 1750 (Tabla 1). El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el más importante de los GEI de origen antrópico y su concentración ha venido en ascenso en las últimas décadas, pasando de 21 a 38 millones de gigatoneladas (Gt) entre 1970 y 2004, lo cual representa el 77% del total de las emisiones antropogénicas de GEI para 2004 (IPCC, 2007). Este aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera está relacionado con los cambios direccionales de la temperatura promedio del planeta, el aumento del nivel del mar y la cobertura de glaciales. De hecho, la organización intergubernamental para el cambio climático (IPCC) establece con un 90 por ciento de certeza la relación causa-efecto entre el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico y el incremento de la temperatura media de la atmósfera y la hidrósfera, el aumento en el nivel del mar y el descongelamiento de glaciales polares. Además, para finales de siglo, las proyecciones del cambio climático bajo el escenario de nivel de emisiones constantes de gases,

sugieren un calentamiento global promedio de 2,4-6,4° C con respecto al promedio de temperatura actual (IPCC, 2007; McDonald y col., 2009).

**Tabla 1.** Gases de Efecto Invernadero (GEI) y su situación en la atmósfera desde la revolución industrial en 1750 (Modificado de Roberts, 2000; IPCC, 2007).

GEI	Concentración actual*	Porcentaje incrementado desde 1750	Tasa de incremento actual (%·año <sup>-1</sup> )	Fuente de GEI relativos al uso de la tierra
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	379ppm	31	0,4	Deforestación e incendios forestales.
Metano (CH <sub>4</sub> )	1745ppb	151	0,4	Excremento de ganado, descomposición de humedales y combustión de biomasa.
Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	314ppb	17	0,25	Deforestación, combustión y aplicación de fertilizantes nitrogenados.
Monóxido de Carbono (CO)	-	-	-	Combustión incompleta de pastizales y sabanas.

\*ppm: partes por mil, ppb: partes por billón

Hoy día, constituye un reto al entendimiento científico evaluar las respuestas de la atmósfera, la hidrósfera y los ecosistemas terrestres ante el surgimiento de lo que ha sido denominado por varios autores como “el nuevo ciclo del carbono”. Aunque pocas dudas existen acerca de que el incremento del CO<sub>2</sub> esté cambiando el clima global del planeta (Ricklefs y Miller, 2000), es frecuente toparse con debates en donde se cuestiona si la contribución antrópica de CO<sub>2</sub> es relevante en el aumento de este gas en la atmósfera. En todo caso, la mayoría coincide en que bajo el escenario de estos cambios, estaremos obligados a crear estrategias que nos permitan contrarrestar los efectos o bien adaptarnos<sup>1</sup> a ellos.

<sup>1</sup> La palabra adaptarnos se emplea aquí como sinónimo de adecuarse, ajustarse, y no en su significado biológico-evolutivo

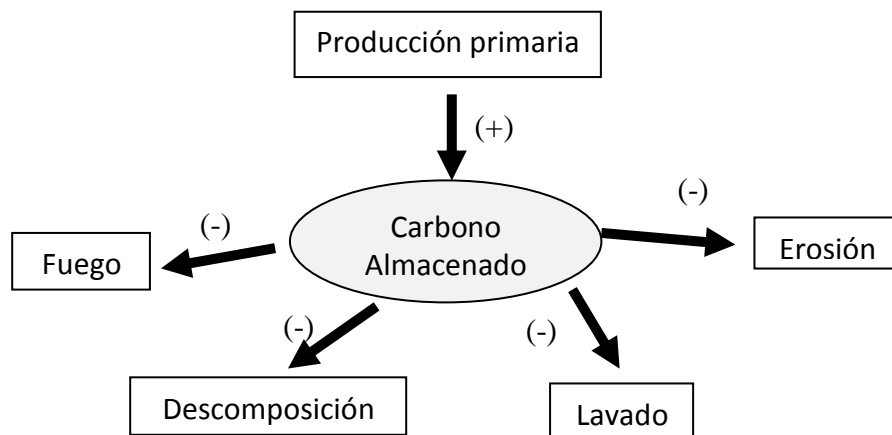
## Los sistemas biológicos terrestres como secuestradores de carbono

El interés sobre los sistemas biológicos como secuestradores de carbono surge a partir de las medidas promovidas por el protocolo de Kyoto (**Naciones Unidas, 1998**) para incrementar la tasa a la cual el carbono circula desde la atmósfera hasta los sumideros. El término “secuestro de carbono” se ha empleado para expresar la retención o acumulación temporal del CO<sub>2</sub> proveniente de la atmósfera, en forma de materia orgánica en el suelo (**Roberts, 2000; Albrecht y Kandji, 2003; Lal, 2004**). Dado que las tasas de captura de CO<sub>2</sub> actuales en el planeta parecen ser insuficientes en la compensación de las emisiones de este gas, se cree que la restauración y creación de nuevos sumideros terrestres a través del aumento en la cobertura vegetal del planeta, permitirá acumular mayores cantidades de carbono en la biomasa terrestre y en especial en la materia orgánica del suelo, tal que la tasa mundial sea mayor a la estimada hasta ahora.

En las últimas dos décadas se ha incrementado la cantidad de árboles plantados en zonas rurales en un esfuerzo por aumentar las cantidades de carbono que son almacenadas en los sistemas terrestres; sin embargo, las preguntas acerca de los efectos ecológicos (pérdida de diversidad, cambios en la funcionalidad, relaciones interespecificas) y sociales (adopción de nuevos sistemas de manejo, sostenibilidad, entre otras) generados por la creación de nuevas zonas boscosas no han sido aclaradas (**Rudel, 2009**). La extensión de las áreas boscosas por la vía de la transformación de sistemas no forestales a sistemas boscosos se ha denominado aforestación. La aforestación promueve cambios en el paisaje y en los procesos ecológicos. Estos cambios pueden devenir en beneficios sobre el tema de calentamiento global en la medida en que promuevan la acumulación de carbono y mejoren la eficiencia de los procesos microbianos de transformación de la materia orgánica; sin embargo, aunque se ha estimado la contribución de la aforestación al ciclo del carbono a escala mundial y regional, existe poca información sobre cambios asociados al carbono del suelo luego del proceso de aforestación (**Paul y col., 2002**).



Con la aforestación, se busca incrementar la productividad vegetal del sistema, promoviendo la acumulación de biomasa en pie que eventualmente se incorporará al suelo a través de la fragmentación y descomposición de los residuos vegetales. La fragmentación es el primer paso de la incorporación de este material vegetal al suelo, y ocurre por la acción de la fauna de invertebrados (en su mayoría), que en él reside. Es este componente de la edafofauna el encargado de las primeras transformaciones de la materia orgánica. La mineralización posterior es mediada por microorganismos, y su velocidad dependerá de la composición del material vegetal de los residuos orgánicos. Las proteínas, almidones y azúcares son los primeros compuestos utilizados por los microorganismos, mientras que la celulosa, la hemicelulosa, grasas y lignina se descomponen más lentamente. El contenido de nitrógeno también suele ser determinante en la calidad de los residuos orgánicos que son incorporados al suelo. Dado que la descomposición microbiana es mediada por procesos enzimáticos y que las proteínas que intervienen tienen un alto contenido de nitrógeno, la asimilación del carbono no puede ocurrir eficientemente sin la asimilación también de nitrógeno. De allí que frecuentemente las tasas de descomposición estén correlacionadas con la relación C/N de la hojarasca (Garay, 2004; Macedo y col., 2008). Sin embargo, hay que destacar que la ganancia de carbono depende también de la importancia de procesos como el lavado, la erosión y la exposición al fuego. Estos procesos junto a la descomposición y la productividad primaria regulan la dinámica del carbono en el suelo (Fig. 2).



**Figura 2.** Diagrama esquemático mostrando los procesos que controlan el almacenamiento de carbono en el suelo (Modificado de Wang y Hsieh, 2002).

## El suelo como sumidero de carbono

A nivel mundial, las regiones con mayor expresión vegetal se han considerado las más importantes en el secuestro de carbono en los sistemas terrestres. Sin embargo, la información disponible acerca de la cantidad de carbono almacenada en la vegetación y en el suelo a nivel mundial, permite discernir mejor la importancia de cada uno de estos compartimientos. La organización que evalúa los recursos forestales mundiales (FRA), reporta los promedios ponderados de la existencia de carbono, por regiones y subregiones mundiales, en la biomasa vegetal, la madera muerta, la hojarasca y los suelos para el año 2005 (Tabla 2). Los valores máximos de existencia de carbono por hectárea se encontraron en Centroamérica, Sudamérica y África occidental y Central. Esto posiblemente se deba a que en estas regiones se encuentra la mayor cobertura boscosa del mundo. Sin embargo, para regiones tales como Asia, Europa y Oceanía, el patrón se invierte y es el suelo el compartimiento con mayor carbono acumulado. Esta tendencia se mantiene en el promedio mundial, donde el carbono existente en el suelo es mayor que el presente en la vegetación, y la diferencia entre ambos compartimientos pudiera ser más amplia si uno considera el carbono de la hojarasca como parte del compartimiento suelo. De manera que es el suelo el mayor reservorio terrestre de carbono.

En términos de porcentaje, alrededor del 75% del total de C de los sistemas terrestres está almacenado en los suelos del mundo, con un 40% de este total asociado a sistemas forestales (**Dixon y col., 1994; Huntington, 1995; Henderson, 1995; McVay y Rice, 2002**). Los bosques tropicales húmedos (los más sujetos a deforestación) exhiben la situación contraria, ya que de las más de 175 toneladas de carbono almacenadas por hectárea (**Roberts, 2000**), el 60% se encuentra en la vegetación y el 40% en el suelo, encontrándose el 36% del carbono total del suelo entre 0 y 1m de profundidad (**Fernández, 2004**). Sin embargo, si se examinan las cantidades de carbono en suelos bajo vegetación no arbórea, como las sabanas y pastizales, la estimación es cercana a la reportada para bosques tropicales (Tabla 3).

**Tabla 2.** Existencia de carbono por hectárea (toneladas de C·ha<sup>-1</sup>) por región y subregión mundial, para el año 2005. Tomado de **FRA, 2005**.

Región/subregión	Carbono en biomasa viva	Carbono en madera muerta	Carbono en hojarasca	Carbono en el suelo	Total de carbono
África oriental y meridional	63,5	7,5	2,1		73,0
África del norte	26,0	3,3	2,1	33,5	64,9
África occidental y central	155,0	9,8	2,1	56,0	222,9
<b>Total de África</b>	<b>95,8</b>	<b>7,6</b>	<b>2,1</b>	<b>55,3</b>	<b>160,8</b>
Asia oriental	37,0	5,0			41,9
Asia meridional y sudoriental	77,0	9,0	2,7	68,4	157,1
Asia occidental y central	39,7	3,6	11,4	41,0	95,8
<b>Total de Asia</b>	<b>57,0</b>	<b>6,9</b>	<b>2,9</b>	<b>66,1</b>	<b>132,9</b>
<b>Total de Europa</b>	<b>43,9</b>	<b>14,0</b>	<b>6,1</b>	<b>112,9</b>	<b>176,9</b>
Caribe	99,7	8,8	2,2	70,5	181,2
Centroamérica	119,4	14,4	2,1	43,3	179,2
Norteamérica	57,8	8,8	15,4	35,8	117,8
<b>Total de Norteamérica y Centroamérica</b>	<b>60,1</b>	<b>9,0</b>	<b>14,8</b>	<b>36,6</b>	<b>120,6</b>
<b>Total de Oceanía</b>	<b>55,0</b>	<b>7,4</b>	<b>9,5</b>	<b>101,2</b>	<b>173,1</b>
<b>Total de Sudamérica</b>	<b>110,0</b>	<b>9,2</b>	<b>4,2</b>	<b>71,1</b>	<b>194,6</b>
<b>Mundo</b>	<b>71,5</b>	<b>9,7</b>	<b>6,3</b>	<b>73,5</b>	<b>161,1</b>

**Tabla 3.** Estimación de las cantidades de carbono orgánico almacenado en suelos de bosques y sabanas (modificado de **IPCC, 2000; Prentice, 2001**).

Ecosistema	Área (10 <sup>9</sup> ha)	COS (billones de toneladas C)	COS (toneladas C·ha <sup>-1</sup> )
Bosques			
- Tropical	1,76	213-216	121-123
- Templado	1,04	100-153	96-147
- Boreal	1,37	338-471	247-344
Sabanas tropicales y pastizales.	2,25	176-295	110-117

COS: carbono orgánico del suelo. C: carbono

Los suelos de sabana en comparación con los de bosque parecen tener hoy en día una mayor posibilidad de aumentar su capacidad de secuestro de carbono, ya que aún cuando su dinámica natural ha sido perturbada (por pastoreo, cultivo, entre otras) han conservado una cantidad considerable de carbono y se estima que con una correcta gestión de manejo de la materia orgánica, la no labranza y la incorporación de componente arbóreo, estas cantidades puedan incrementarse, y a su vez mejorar la estructura, fertilidad y biodiversidad del suelo. De acuerdo con **Rondón y col. (2006)** el máximo potencial de las sabanas para el almacenamiento de carbono en el

suelo, resultaría de la total conversión de la tierra disponible en sistemas de cultivo, de pastos o agroforestales, lo cual teóricamente generaría un incremento de 1,02 Pg de carbono, lo cual representa el 32% del excedente de C en la atmósfera. Sin embargo, esta opción no ha sido considerada del todo debido a la pérdida en diversidad animal, vegetal y funcional que acarrearía.

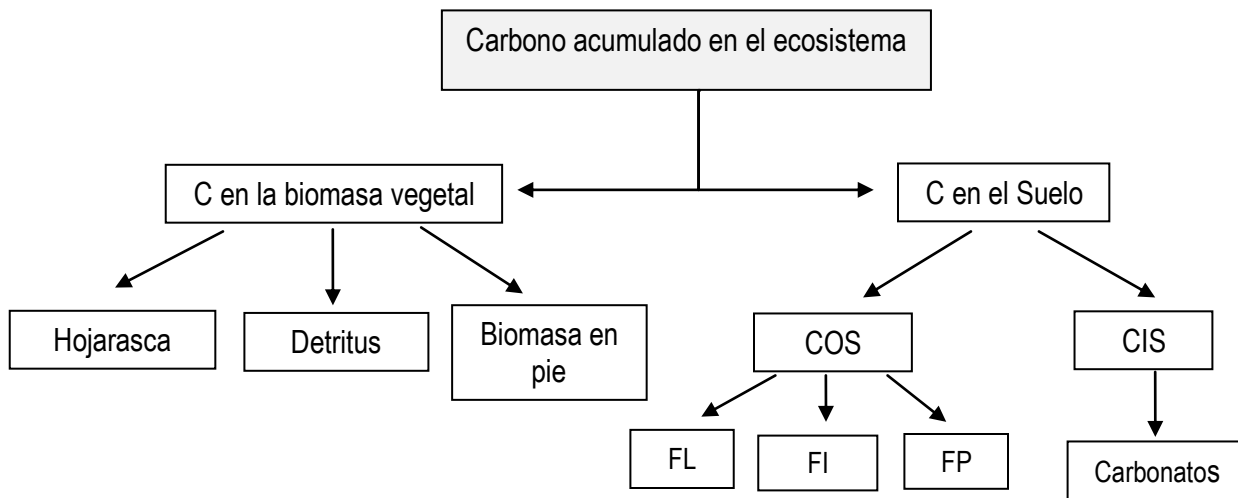
El secuestro potencial de carbono de cualquier suelo depende de su capacidad para almacenar compuestos vegetales resistentes a la oxidación y acumular sustancias húmicas originadas de las transformaciones de materiales orgánicos en el suelo. Además, su composición mineralógica y la proporción de arenas, limos y arcillas pueden conferir resistencia física a la degradación de la materia orgánica, dada la interacción entre moléculas de carbono y los coloides inorgánicos del suelo que forman agregados que protegen físicamente a las fracciones lábiles de la degradación por microorganismos (**Jacinthe y col., 2004; Bertora y col., 2009**).

#### La materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo (MOS) representa el 62% del total del reservorio edafológico, con un estimado de 1550Pg (**Lal, 2004; Macedo y col., 2008**). La MOS es una mezcla heterogénea de residuos de orígenes biológicos diferentes, con distintos grados de transformación y con tiempos de descomposición variables. Según **Theng y col.** (1989) está compuesta de una fracción viva (4%) y una fracción muerta (96%). Dentro de la MOS viva están el componente de raíces (5-10%), macroorganismos o edafofauna (15-30%) y los microorganismos (60-80%). La MOS muerta está conformada por la materia macroorgánica y el humus (Fig. 3). Químicamente, está conformada principalmente por carbohidratos, lípidos y proteínas que son abundantes en los residuos de las plantas, los cuales son rápidamente metabolizados, inmovilizados o descompuestos (**Dilly y col., 1997**).

Bajo el contexto de la dinámica de descomposición de la MOS, es decir, desde el punto de vista de su labilidad frente a la oxidación química o al ataque microbiano, ésta puede ser dividida en fracciones de fácil descomposición, fracciones de lenta descomposición y fracciones pasivas (**Parton y col., 1987**). Los compuestos de fácil descomposición son mineralizados rápidamente y el producto final es dióxido de carbono,

agua, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, los cuales pueden ser usados como nutrientes por las plantas o ser incorporados o inmovilizados por los microorganismos, en el desarrollo de su propia actividad metabólica (Tabla 4). Los compuestos más resistentes y la fracción pasiva de la MOS son mineralizados lenta y conjuntamente con sustancias re-sintetizadas de origen microbiano, dando origen a un material oscuro, heterogéneo y coloidal denominado humus (**Casanova, 2005**). El humus es definido por **Brady (1996)** como un complejo mixto y bastante resistente de sustancias amorfas, oscuras y coloidales que han sido modificadas del tejido biológico original o han sido sintetizadas por varios organismos del suelo. Su descomposición hasta formas iónicas más simples puede llevar cientos de años, siendo su estabilidad atribuida a la estructura química de estos compuestos, a su protección dentro de los agregados del suelo o a que están químicamente protegidas en asociaciones orgánico-minerales con las partículas de arcilla y metales (**Parton y col., 1987**).



**Figura 3.** Componentes de la materia orgánica ó carbono terrestre. C: carbono, COS: carbono orgánico del suelo, CIS: carbono inorgánico del suelo, FL: fracción ligera, FI: fracción intermedia, FP: fracción pasiva (adaptado de **Lal, 2005**).

La fracción de fácil descomposición puede ser asociada con la fracción ligera (FL) obtenida durante el fraccionamiento físico de la MOS, mientras que las formas pasivas de la MOS suelen asociarse a la fracción pesada (FP), aquella que sedimenta durante el fraccionamiento. Sin embargo, hay que tener presente que dependiendo de la densidad del líquido en la cual ocurre la separación de las fracciones, la FL contendrá más o menos sustancias recalcitrantes, que aunque homologas en tamaño difieren en el tiempo de residencia en el

suelo. Por otra parte, evaluar el cambio en la proporción de las distintas fracciones, incluyendo la formación de sustancias húmicas, permite monitorear el destino del carbono incorporado al suelo desde la hojarasca e indagar acerca del potencial de acumulación de carbono del suelo luego de la adopción de nuevos sistemas de manejo de tierras o del cambio del tipo de vegetación.

**Tabla 4.** Compartimientos orgánicos dinámicos de la materia orgánica del suelo, composición y tiempo de recambio en años (Modificado de **Parton y col., 1987**).

<b>Fracción dinámica</b>	<b>Tiempo de Residencia (años)</b>	<b>Composición</b>	<b>Nombre alternativo</b>
Residuos metabólicos	0,1 - 0,5	Contenido celular, celulosa	Residuos de plantas y animales
Residuos estructurales	0,3 - 2,1	Lignina, Polifenoles	Residuos de plantas
Compartimiento activo	0,2 - 1,4	Biomasa microbiana, carbohidratos solubles, enzimas extracelulares.	Fracción lábil
Compartimiento lento	8 - 50	Materia orgánica particulada (50mm - 2,0 mm)	Fracción lábil
Compartimiento pasivo	400 - 2200	Ácidos húmicos y fúlvicos, complejos órgano-minerales.	Sustancias húmicas

La transformación de las sustancias orgánicas entre las distintas fracciones está estrechamente vinculada al proceso de descomposición, en el cual los microorganismos son protagonistas. Éstos constituyen la biomasa microbiana (BM) del suelo. La actividad microbiana refleja la actividad biológica del suelo y constituye un buen indicador de la calidad del mismo, siendo el componente más sensible a las perturbaciones (**Nannipieri, 1994; Brelan y Eltum, 1999**). Además, la BM representa el reservorio de carbono y nitrógeno lábil, funge como agente estabilizador y/o formador de agregados del suelo y contribuye a la estabilización del carbono en el suelo. Sin embargo, no hay que olvidar el importante papel que la fauna invertebrada del suelo (macrofauna) juega en la mineralización y humificación de la materia orgánica, la modificación del suelo por remoción y mezcla, además del aporte al flujo total de CO<sub>2</sub> en el suelo producto de su actividad metabólica.

## Monitoreando el destino del carbono en el suelo

Si consideramos en conjunto los procesos involucrados en los mecanismos de secuestro de carbono terrestre que se han mencionado, la cuantificación del carbono de la FL, la FP y la BM nos dará información acerca de los cambios en la dinámica de este elemento como consecuencia de la transformación de un sistema no forestal en uno boscoso. Existen, sin embargo, otros indicadores de los procesos de transformación que sufre la MOS tales como la respiración edáfica, la respiración basal, y la actividad de enzimas relacionadas con el ciclo del carbono. La respiración edáfica contempla la respiración llevada a cabo tanto por los microorganismos como por las raíces e invertebrados del suelo, mientras que la respiración basal solo contempla la llevada a cabo por microorganismos. Ambas, son una medida indirecta de la actividad microbiana, la tasa de descomposición de la MOS y de la calidad del carbono del suelo (Brookes, 1985; Anderson, 1982 citados en **Gómez, 2005**).

En la medida en que la energía contenida en el carbono del suelo sea accesible para los organismos del suelo, las tasas de descomposición y respiración serán mayores. Sin embargo, el proceso de descomposición pueden ser favorecido sin que necesariamente la tasa de respiración sea elevada, y ello dependerá de la eficiencia metabólica de estos organismos. El cociente metabólico expresa la respiración específica por unidad de carbono de la biomasa microbiana (**Saviozzi y col. 2001**). Valores bajos de este cociente indican menores costos de mantenimiento y aumento de la tasa de mineralización. Por su parte, hacer la diferenciación de la respiración edáfica y basal permite sopesar la contribución de las raíces y de la edafofauna en el flujo de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. El papel que juega la macrofauna en las primeras fases de desintegración de los residuos vegetales es relevante no solo en tanto la producción de CO<sub>2</sub>, sino también en el ciclaje de nutrientes, fertilidad del suelo, agregación, entre otros (**Hernández, 2010**). Dado que las emisiones de CO<sub>2</sub> en los ecosistemas terrestres ocurren principalmente a través de los procesos microbiológicos del suelo, las variaciones de su flujo estará regulado por las mismas condiciones que controlan las actividades microbianas, tales como temperatura, agua y disponibilidad de carbono y nitrógeno (**Konda y col., 2008**).

A pesar de la importancia de los parámetros microbiológicos y bioquímicos para hacer comparaciones entre los ecosistemas nativos y aquellos modificados, las investigaciones en este campo son escasas en las sabanas tropicales que han sido reemplazadas por sistemas de pasturas ó boscosos (**Gómez, 2005**). Poco se conoce sobre los impactos ecológicos de este cambio en el uso de la tierra y en la dinámica del carbono en suelos venezolano. **Rondón y col.** (2006) afirman que la data disponible hasta ahora para las sabanas neotropicales, no indica cambios netos en el carbono acumulado en los suelos de sabanas como resultado de la expansión de plantaciones arbóreas, bien porque las metodologías disponibles no han sido estandarizadas de acuerdo a los tipos funcionales y unidades fisiográficas, porque solo se cubren los primeros 30cm de suelo en las comparaciones ó porque los trabajos al respecto han procurado evaluar la cantidad de carbono almacenado y no la tasa a la cual esto ocurre. Además, no debe desestimarse el papel estabilizador de los horizontes subsuperficiales, donde la materia orgánica está menos expuesta a agentes exógenos y el carbono, generalmente, más humificado ó formando agregados órgano-minerales.

Aún con las limitaciones metodológicas en la estimación del secuestro de carbono y la contribución de cada compartimiento terrestre, los indicadores físicos, químicos y biológicos hasta ahora utilizados han proporcionado una importante información sobre los cambios que han de esperarse producto de transformaciones a nivel de ecosistema. Actualmente se propone incorporar nuevos elementos que permitan refinar el nivel de resolución de los estudios, tales como: estudiar los cambios en el suelo a nivel superficial y subsuperficial, corregir los valores de carbono con la densidad aparente de cada suelo, tomar en cuenta el tiempo luego de la transformación, entre otros.



## ANTECEDENTES

---

El cambio en la cobertura boscosa por aforestación ha ocurrido principalmente en respuesta a la creciente demanda económica y social por recursos madereros y sus derivados, y solo alrededor del 21% de estos cambios responde a fines protectores del suelo y el agua (FRA, 2005). Dentro de la perspectiva ecológica, muchos estudios han mostrado que la inclusión de árboles en tierras agrícolas, frecuentemente mejora la productividad del sistema a la vez que provee la oportunidad de crear sumideros de carbono (Winjum y col., 1992; Dixon y col., 1993; Krankina y Dixon, 1994). Albrecht y Kandji (2003) estiman que el potencial de secuestro de carbono en sistemas agroforestales está entre 12 y 228  $\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}$  con un promedio de 95  $\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}$ , siempre y cuando la producción de biomasa sea adecuada como para derivar en cambios positivos en las propiedades del suelo. La alta variación de valores potenciales de secuestro de carbono, no permite intuir si a escala local los efectos esperados, de aumento en el carbono del suelo luego de aforestación, puedan ser significativos o no.

San José y col. (1998) estimaron la tasa neta de fijación de carbono para sabanas convertidas naturalmente en bosque seco, en 8,6 toneladas de  $\text{C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , lo cual contrasta con las tasas reportadas por Cairns y col. (1996) para bosques tropicales siempre verde de 1-2  $\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  y el total para los bosques de América de 1,1 – 1,3  $\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  reportado por Malhi y Grace (2000). Aunque hay que destacar que en el caso de San José y col. dicha tasa fue estimada en estadios tempranos del crecimiento vegetal, cuando la productividad suele ser mayor, mientras que los otros dos casos corresponden a bosque maduros. Aún así, el rol de los sistemas forestales, agrícolas y el suelo como sumidero y/o fuente de gases invernadero sigue siendo materia de discusión (Hugues y col. 2002, Bellamy y col. 2005).

Lal (2004) reporta que el potencial global de secuestro de carbono orgánico del suelo, a través de la adopción de prácticas de manejo de tierras recomendadas, es de  $0,9 \pm 0,3 \text{ PgC}\cdot\text{año}^{-1}$ . Estas tasas se estiman que pueden compensar un cuarto o un tercio del incremento anual del  $\text{CO}_2$  atmosférico, el cual está estimado en  $3,3 \text{ PgC}\cdot\text{año}^{-1}$ .

**Paul y col.** (2002) evaluaron los cambios en el carbono del suelo luego de aforestación. Reunieron la información disponible en 43 estudios publicados y no publicados que comprenden 204 sitios de estudio con diferencias en el número de años transcurridos luego del establecimiento de las plantaciones y tipo de estudio (parcelas adyacentes con diferente uso de tierra, parcelas adyacentes con edades diferentes, misma parcela en el tiempo y capa de subsuelo superficial). Encontraron que, en promedio, el carbono del suelo disminuye en 3,46% por año en los primeros 10 cm y 0,63% por año en los primeros 30 cm. Esto ocurría en un período comprendido entre los 5 primeros años después de la aforestación. Posteriormente, hay una recuperación progresiva del contenido de carbono hasta que se encuentra un valor similar al de los cultivos previos a la aforestación, al completarse 30 años. En plantaciones mayores a 30 años el carbono del suelo a profundidades mayores a 10 cm incrementa entre 0,50 y 0,86%, por año. Estos resultados ponen en evidencia que dependiendo de la escala temporal en la cual se evalúan los cambios en el contenido de carbono en el suelo, las conclusiones sobre su efectividad o no serán distintas. Además, refleja que mientras más tiempo haya transcurrido luego de la aforestación, los cambios pudieran también apreciarse a profundidades mayores.

Gill y Abrol y Resh (1990; 1999; en **Paul y col., 2002**), en Hawái y Puerto Rico, encontraron que el aumento en el carbono del suelo fue mayor cuando se emplearon plantaciones de especies fijadoras de N<sub>2</sub> en la aforestación, en vez de otras especies como *Eucalyptus sp.* Esto apoya la hipótesis de que emplear especies fijadoras de nitrógeno puede acelerar las tasas totales de acumulación de carbono. En la India, **Laik y col.** (2009) estudiaron el efecto de la aforestación con 6 especies arbóreas, sobre el carbono lábil de la MOS luego de 18 años de establecida la plantación. En este estudio se incluyeron dos especies del género *Acacia* (*A. procera* y *A. lenticularis*). Laik y col. encontraron diferencias significativas en el contenido de carbono orgánico, la biomasa microbiana, la fracción ligera y la respiración evaluada en los primeros 30cm de suelo.

**Macedo y col.** (2008) estudiaron el potencial de leguminosas fijadoras de nitrógeno (incluyendo a *Acacia mangium*) combinadas con micorrizas, en recuperar áreas degradadas. Encontraron que, luego de un período

corto de 13 años, la técnica de recuperación fue efectiva incrementando en 35 y 25% el carbono y el nitrógeno del suelo, lo cual representa un incremento anual de 1,73 Mg ha<sup>-1</sup> y 0,13 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Concluyen que la técnica fue eficiente en el restablecimiento de los procesos de ciclaje de nutrientes, además de ser efectiva en el secuestro de dióxido de carbono desde la atmósfera. Sin embargo, los valores obtenidos en su estudio representan aumentos del reservorio de carbono con respecto a las áreas degradadas, lo cual no se cumple al compararlos con los reservorios del bosque nativo.

En Venezuela, los estudios de cambios en el almacenamiento de carbono seguido de prácticas de aforestación son escasos. **Campos** (1999) estudió el efecto de la siembra de *Pinus caribbea* L. sobre las fracciones de la MOS, en Uverito, Edo Monagas. Encontró el contenido de carbono incrementó en FL en los primeros 5cm de suelo. Este incremento fue asociado al mayor aporte y menor tasa de descomposición de la MOS que produce este sistema forestal, siendo la FL y la FP las que contribuyeron en mayor proporción al aumento de la MOS. Por su parte, **Castro** (2007) reconoce luego de su investigación acerca del manejo y conservación de la MOS en suelos de sabanas, que la aplicación de técnicas adecuadas de labranza, fertilizantes nitrogenados y el uso de coberturas pastos-leguminosas, entre otras, reduce la erosión física de la MOS de sabanas tal que mejora el almacenamiento de carbono de estos ecosistemas.

Los estudios hasta ahora señalados, han reportado resultados positivos presuntamente promovidos por la aforestación. Sin embargo, las tasas, unidades y escala a la cual se reportan estos cambios no se encuentran estandarizadas. Además de ello, las diferencias entre las metodologías aplicadas y el rigor científico no permiten una buena aproximación a la contribución real de la aforestación en la reducción del CO<sub>2</sub> atmosférico (**Paul y col. 2002, Nair y col. 2009**). Es importante señalar que la mayoría de los estudios llevados a cabo evalúan solo profundidades de hasta 30cm, aun cuando se ha establecido que en el contexto de cambio climático, deben considerarse profundidades entre 1 y 2 metros (**Fernández, 2004**). Esto es, debido a que los cambios son más evidentes en la superficie donde la materia orgánica está siendo continuamente transformada. Sin embargo, el

interés debe estar en aquellas sustancias recalcitrantes producto de estas transformaciones que se infiltran en el suelo, lo cual, junto a su naturaleza pasiva y mayor tiempo de residencia, favorecen la acumulación del carbono. Esto último, reafirma la importancia de la escala temporal de evaluación, ya que es posible no observar cambios si el tiempo luego de la aforestación es menor a 10 años, aunque ello depende de las particularidades del sistema.

Entre otras investigaciones sobre el impacto ecológico de plantaciones de *Acacia mangium* se encuentran los trabajos de **Bouillet y col.** (2008), en Brasil, quien luego de evaluar plantaciones mixtas de *A. mangium* y *Eucalyptus sp.* concluye que plantar especies fijadoras de nitrógeno es una opción atractiva para mejorar el estatus de este macroelemento en el suelo. En Indonesia, **Yamashita y col.** (2008) estudiaron los cambios en la acidez del suelo y en el contenido de bases inducido por *A. mangium* respecto a los obtenidos para un bosque secundario y una sabana de *Imperata cylindrica*. Encontraron una correlación positiva significativa entre el porcentaje de saturación de bases y el pH del suelo y consideraron que esta evidencia confirma su hipótesis de trabajo de que dado las altas tasas de crecimiento de esta leguminosa, los cationes bases del suelo son rápidamente incorporados en la biomasa de la planta, lo cual conlleva a un incremento en la saturación de aluminio del complejo de intercambio del suelo. **En China, Yang y col.** (2009) probaron el potencial de facilitación de dos especies de *Acacia*. Esta facilitación se refiere al cambio en una serie de factores microclimáticos que luego promoverán el establecimiento de aquellas especies con mayor susceptibilidad al estrés ambiental. Los autores encontraron que *Acacia mangium* presentó resultados más significativos debido a su gran efecto buffer sobre la temperatura, la reducción de la radiación y la mejora en la disponibilidad de nutrientes.

Por otra parte, **Arai y col.** (2008) sugirieron que las plantaciones de *A. mangium* en Asia tropical promueven la emisión de  $N_2O$  desde la superficie del suelo y que la importancia de estas emisiones ha incrementado en las últimas décadas, debido al incremento del área ocupada por *Acacia* y otras leguminosas en Asia. **Konda y col.** (2008) estudiaron este aspecto incluyendo el  $CO_2$  y el  $CH_4$  y encontró que el suelo de *A. mangium* funciona como

una gran fuente de  $N_2O$  respecto al bosque natural adyacente a la provincia de Suamatra en la época seca mientras que las emisiones de  $CH_4$  y  $CO_2$  fueron consistentes con las del bosque natural. En un estudio similar, **Verchot y col.** (2008) compararon las emisiones de  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $NO$  y  $N_2O$  de suelos con barbecho mejorado de *Ingia edulis* y *A. mangium* y encontraron que los barbechos mejorados que usan árboles fijadores de nitrógeno no parecen disminuir las reservas de  $CH_4$  en el suelo y tampoco incrementar las emisiones de  $CO_2$  y óxido de nitrógeno en suelos arenosos de la Amazonía.

## HIPOTESIS Y OBJETIVOS

---

### Premisa:

Los sistemas boscosos acumulan mayor cantidad de biomasa que los sistemas de sabana. La caída de hojarasca al suelo también suele ser mayor en sistemas boscosos. Por otra parte, la cantidad de materia orgánica que se incorpora al suelo suelen ser mayor en sistemas cuyas entradas en residuos vegetales son abundantes.

### Hipótesis:

La transformación de una sabana de *Trachypogon spicatus* a un sistema boscoso más productivo dominado por la especie leguminosa *Acacia mangium*, aumentará las cantidades de carbono incorporadas al suelo superficial y sub superficial.

Con base en esta hipótesis se plantearon los siguientes objetivos:

### **Objetivo General**

Determinar si las plantaciones de *Acacia mangium* incrementan las cantidades de carbono presentes en un suelo de sabana.

### **Objetivos Específicos**

- \* Evaluar la contribución de las fracciones dinámicas de la MOS al carbono total a partir del análisis de la fracción soluble, la fracción ligera, la fracción pesada de la MOS y el carbono microbiano del suelo.
- \* Evaluar las diferencias de la actividad metabólica del suelo bajo plantaciones de *A. mangium* y el suelo bajo vegetación de *T. spicatus* a través de la estimación de la respiración edáfica y la respiración microbiana del suelo.
- \* Determinar hasta que profundidad ocurren cambios en el carbono del suelo inducidos por plantaciones de *A. mangium*.

## ÁREA DE ESTUDIO

---

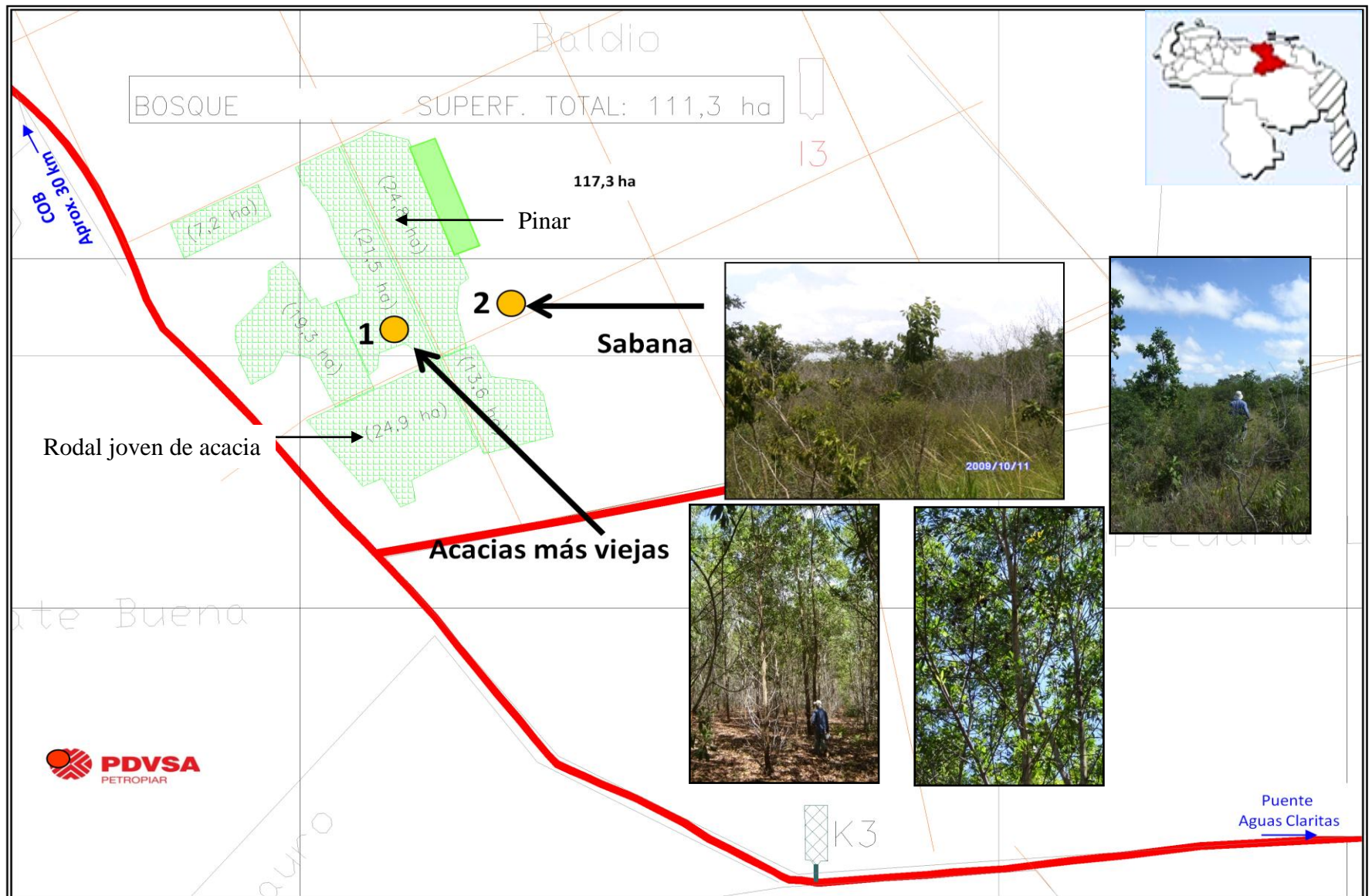
El estudio se llevó a cabo en las cercanías de la ciudad de El Tigre en el estado Anzoátegui donde la empresa PDVSA Petropiar ha establecido plantaciones de *Acacia mangium*, una especie arbórea leguminosa de origen australiano. Estas plantaciones forestales se establecieron en el año de 1999 bajo la figura de “Bosques de Compensación de Carbono” con el propósito de mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante las operaciones de la empresa. Alrededor de 111,3ha de sabanas han sido transformadas en bosques forestales, de las cuales cerca de 47ha son ocupadas por bosque de *Acacia mangium*.

El manejo de acacia no ha contemplado fertilización ni encalado de suelos y, durante la siembra por parte de Petropiar, se contemplaron solo las siguientes labores:

- \* Preparación de suelos (mecanización con tractor agrícola: tres pases cruzados de rastra)
- \* Ahoyaduras y siembra manual
- \* Control de bachacos durante la siembra utilizando: Tatucito (Granulado) y Atilan (polvo).

La cohorte de acacia considerada en este estudio tiene una edad de 10 años, ubicada a unos 200 metros de la sabana testigo. Entre la sabana y el bosque se encuentra una hilera de pinos de mayor edad que el bosque de acacia, el cual ha contribuido, junto a los cortafuegos, a proteger la sabana contra incendios. Esto ha permitido un mayor desarrollo herbáceo y arbóreo en esta parcela respecto al paisaje de sabana fuera del complejo petrolero. En la Fig. 4 se muestra la ubicación relativa de la sabana y del bosque de acacia en el área de estudio.

Por su parte, el bosque presentó una altura media de aproximadamente 15m con pocos individuos viejos (DAP>20cm), considerándose un rodal joven, abundante hojarasca y actividad de invertebrados en el suelo tales como escorpiones y lagartijas. También se observó abundancia de hongos. En la sabana la actividad de la edafofauna no fue evidente durante los días de muestreo.



**Figura 4.** Ubicación del área de estudio. En las afueras de la ciudad de El Tigre, Edo. Anzoátegui, se encuentran las instalaciones de PDVSA Petropiar. Se muestra croquis de ubicación relativa del bosque de *Acacia mangium* y la sabana de estudio (Croquis: cortesía de PDVSA Petropiar).



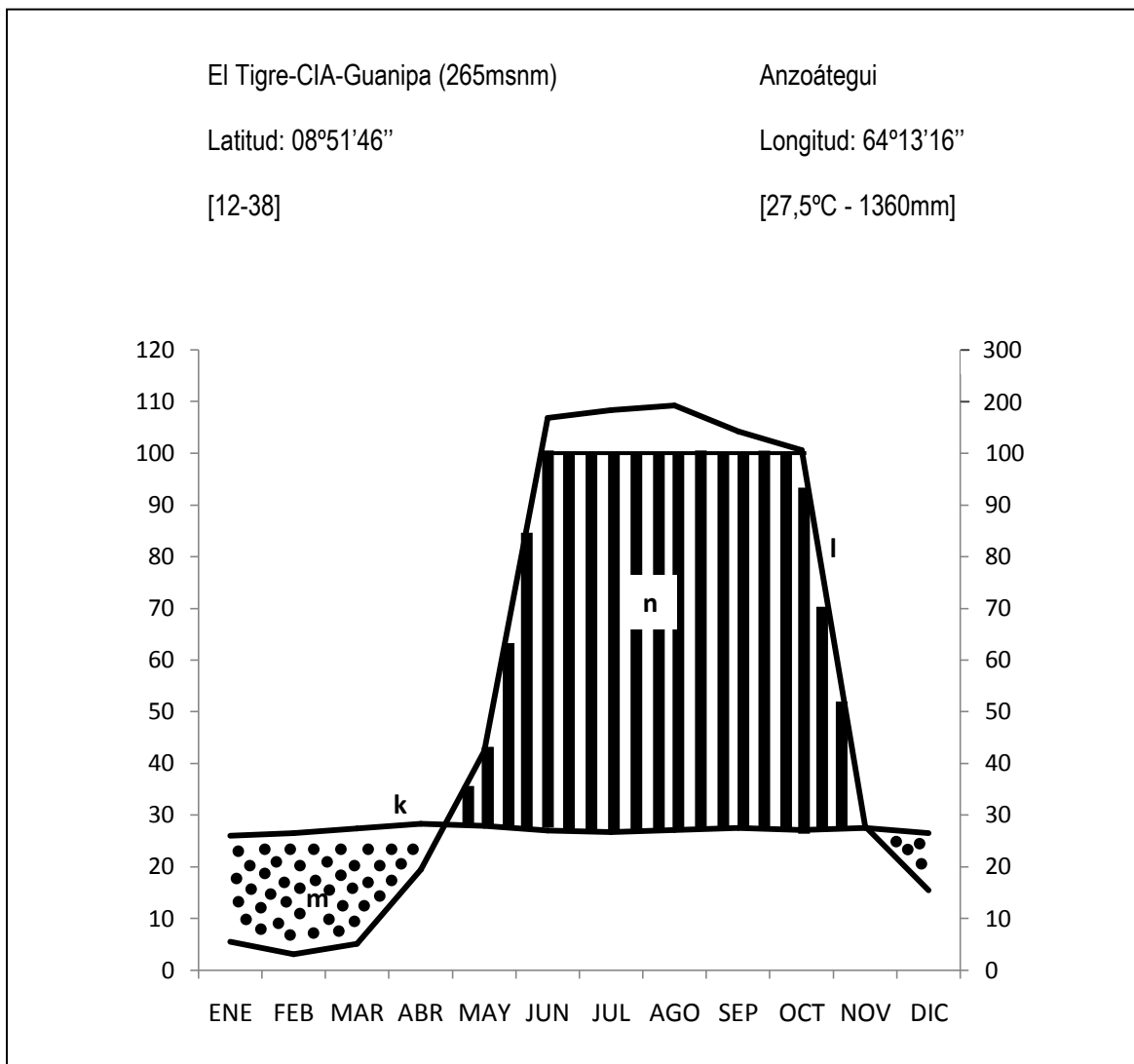
La ciudad de El Tigre forma parte de la subregión natural de los Llanos Orientales de Venezuela. El paisaje geomorfológico predominante es de altiplanicies perteneciente a la Formación Mesa. Dicha Formación está constituida por arenas de grano grueso y grava con mucho cemento ferruginoso formando conglomerados duros (Zinck y Urriola, 1970). El clima es isohipertérmico, con temperatura media anual de 27,5°C y diferencia de 3,6°C entre el mes más frío (julio, 26-27°C) y el mes más cálido (marzo-abril, 28-30°C). El régimen hídrico es marcadamente estacional con precipitación promedio anual de 1.360mm, de los cuales 1.194mm, aproximadamente, caen durante los meses de mayo a octubre.

Los suelos son ácidos, con baja capacidad de intercambio catiónico y pobres en nutrimentos. La textura varía entre arenosa a franco-arenosa. De acuerdo a la clasificación de los suelos (USDA, 2006), éstos corresponden al orden Haplustox. El uso más común de los suelos en la región es la ganadería extensiva, aunque actualmente no se desarrolla como consecuencia de la actividad petrolera.

La vegetación predominante en el área es la de sabanas abiertas. El estrato herbáceo está dominado por *Trachypogon spicatus* (Saeta) y *Aristida longifolia* lo que corresponde a más del 90% en biomasa herbácea presente en el área de estudio. Adicionalmente, se encuentran individuos de *Axonopus canescens* (Paja Burrera), *Bulbostylis capillaris* (Caujera), *Sida rhombifolia* (Escoba) e *Hyptis suaveolens* (mastranto). El elemento leñoso se encuentra formando grupos (matas) con especies tales como *Curatella americana* (Chaparro), *Byrsonima crassifolia* (Manteco) y *Bowdichia virgiloides* (Alcornoque).

El muestreo se llevó a cabo en octubre de 2009, correspondiente al período de humedad o lluvioso de acuerdo con el climadiagrama de Gaussen de la zona (Fig. 5). Sin embargo durante la duración del trabajo de campo, aproximadamente cuatro días, no se registraron lluvias en la zona de muestreo.

En el bosque se observó abundante hojarasca y actividad de invertebrados en el suelo tales como escorpiones y lagartijas. También se observó abundancia de hongos. En la sabana la actividad de la edafofauna no fue evidente durante los días de muestreo.



**Figura 5.** Climadiagrama de Gausson para la zona de estudio: El Tigre, Edo. Anzoátegui (Fuente: INIA e INAMEH).

***Acacia mangium***

*Acacia mangium* es una especie nativa del noreste de Australia y del este de Indonesia, incluyendo las islas Molucas, y Papúa Nueva Guinea. Pertenece a la familia de las leguminosas (Leguminosae), sub-familia Mimosidae (Fabaceae), tribu Acacieae. Es una especie arbórea que puede llegar a medir de 20 - 30 m de altura y hasta 90 cm de diámetro a la altura del pecho. Los árboles juveniles presentan una corteza lisa y verdosa, y las fisuras comienzan a desarrollarse a partir de los 2-3 años de edad. Presenta hojas compuestas sólo durante unas

semanas después de la germinación; posteriormente sólo permanecen los filodios (peciolos aplanados) simples y de borde entero que fungen como hojas. Estos filodios llegan a medir hasta 25cm de largo y entre 3,5-10cm de ancho, presentando venación secundaria. La floración suele iniciarse a finales del periodo de lluvia hasta mediados del periodo seco, y los frutos se dan unos cinco a siete meses después de la floración (**CONAFOR**).

*A. mangium* ha sido también introducida en Japón, Indonesia, Puerto Rico y Brasil, entre otros países. Se han reportado una serie de beneficios derivados del uso de *A. mangium* en sistemas forestales tales como la promoción del secuestro de carbono (**Resh y col., 2002**), la mejora del ciclaje de nutrientes y la reducción del riesgo a daño por plagas (**Kelty, 2006**), además de los beneficios económicos derivados de la comercialización de su madera.



**Figura 6.** A: Rodal de *Acacia mangium* en El Tigre, Edo Anzoátegui. La fotografía fue tomada en el área de estudio de éste trabajo. B: Detalle de hojarasca, semillas y hongo creciendo en la parcela de *A. mangium*. C: Detalle de las hojas verdes de *A. mangium*.

## MÉTODOS

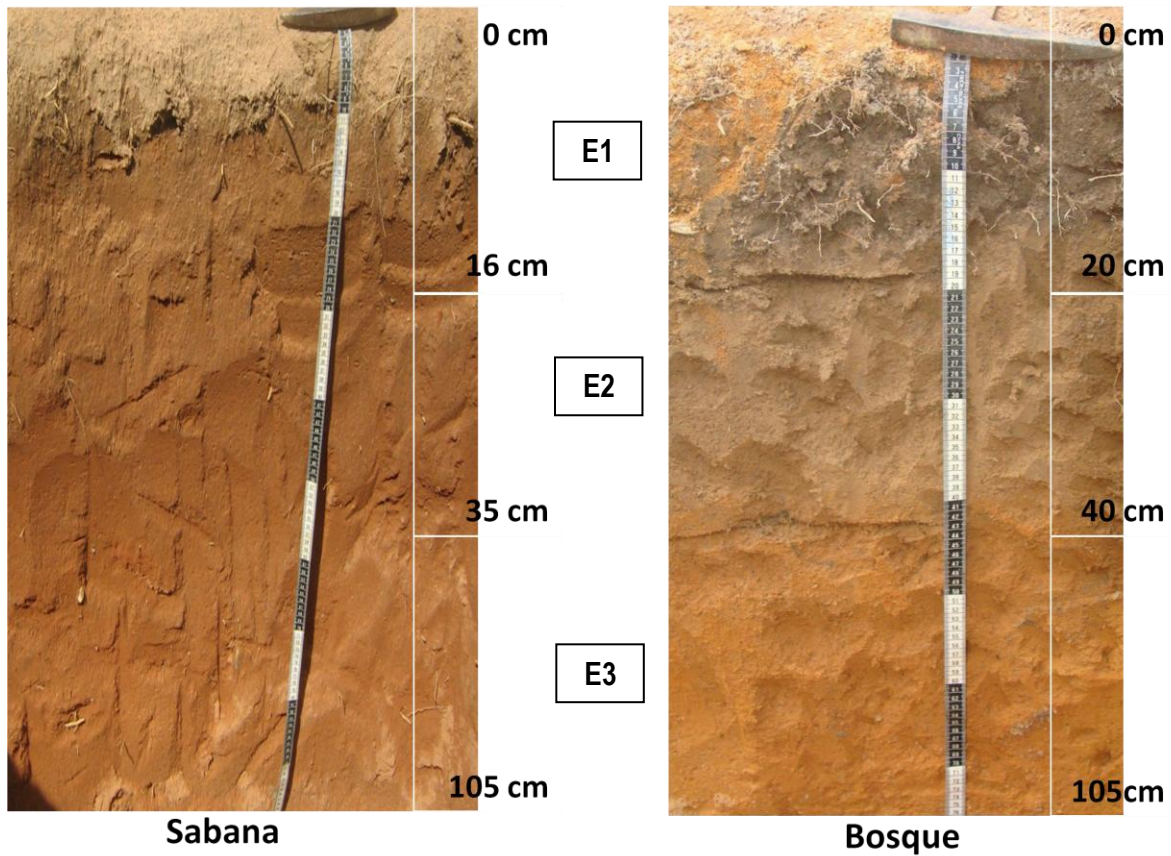
---

### 1. Metodología de campo.

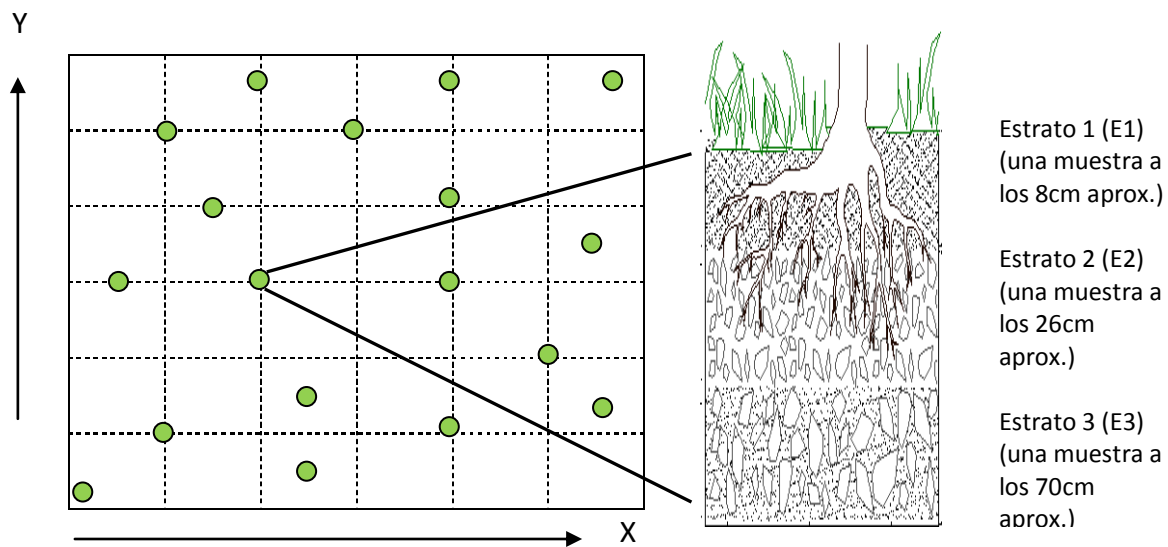
En cada área (bosque y sabana) se examinaron las calicatas establecidas y se identificaron en cada una de ellas tres estratos. Las profundidades de cada estrato se muestran en la Fig. 7. Una vez definido el espesor de cada estrato, se tomaron nueve muestras de suelo para determinar la densidad aparente ( $D_a$ ). Para ello se emplearon cilindros de metal de 2cm de diámetro y 3cm de alto ( $28.27\text{cm}^3$ ), que fueron introducidos en el suelo cuidando no compactar la muestra. La cantidad de suelo colectada en dichos cilindros fue vertido en bolsas plástica previamente identificadas, para luego ser secadas y pesadas en el laboratorio.

Se estableció una parcela para el muestreo en cada zona de 50 x 200m, equivalente a 1ha, dentro de la cuales se eligieron al azar 18 puntos de muestreo. En cada punto se tomaron las muestras de suelo con un barreno, el cual se introdujo a la profundidad intermedia de cada estrato identificado. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas en frío en bolsas plásticas para su posterior análisis en el laboratorio. Se Tomaron 18 muestras por estrato, 54 muestras por zona, para un total de 108 muestras simples de sabana y bosque.

Para la estimación de la respiración edáfica, se colocaron 8 trampas de álcali sobre el suelo de cada zona. Para ello se expuso el suelo apartando la hojarasca y eliminando las raíces superficiales. Dichos puntos donde se expuso el suelo, fueron elegidos al azar. Se colocaron 33,5mL de NaOH 0,5M en fiolas, las cuales fueron aisladas de la atmósfera circundante por medio de un recipiente plástico fijado al suelo, que las cubría en su totalidad. En principio el  $\text{CO}_2$  generado por respiración durante el ensayo entra en contacto con la solución de NaOH, quedando atrapado. Luego de transcurridas 24horas, se agregaron 3mL de  $\text{BaCl}_2$  generando la formación de carbonato de calcio. El NaOH remanente fue valorado con HCl 0,5M. El cálculo de la cantidad de  $\text{CO}_2$  emitida por el suelo se obtiene con la misma fórmula empleada en respiración basal.



**Figura 7.** Esquema que ilustra las profundidades de los estratos (E1, E2 y E3) identificados en campo para cada zona de muestreo (Sabana y Bosque).



**Figura 8.** Esquemización del diseño de muestreo. Los círculos indican los puntos elegidos al azar en cada zona, en parcelas de 50x200m. En cada punto de muestreo se tomó una muestra de suelo, con barreno, por estrato.

## 2. Metodología de laboratorio.

### 2.1 Composición de las muestras e identificación de horizontes

Se realizó una composición de las muestras obtenidas en campo. Para ello se procedió a elegir al azar tres muestras provenientes de una misma zona y de un mismo estrato, las cuales se vertieron en un recipiente para ser homogenizadas manualmente. Una vez mezcladas, la muestra compuesta se identificó con la zona y el estrato correspondiente y fue tamizada para obtener la fracción menor a 2mm. Se procedió de igual manera con los demás estratos en cada zona hasta obtener seis muestras compuestas por cada estrato, para un total de 18 muestras compuestas por zona.

Se identificaron los estratos determinados con los horizontes correspondientes de acuerdo a sus características fisicoquímicas en:

Estrato 1 (E1): Horizonte A. Horizonte de eluviación.

Estrato 2 (E2): Horizonte Bt1. Horizonte de iluviación.

Estrato 3 (E3): Horizonte Bt2. Horizonte de iluviación.

Tanto la sabana como el bosque presentan estos horizontes.

#### 2.1.1 Caracterización física y química de los horizontes del suelo.

2.1.2 Análisis textural: para este análisis se empleó el método de la pipeta descrito por **Gasparotto y col.** (2003). Éste método permite determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla de acuerdo a la velocidad de sedimentación diferencial de cada grupo de partículas. En particular, la precisión del método de la pipeta en suelos con bajo porcentaje de arcilla suele ser mejor que la obtenida con el método de Bouyucos. Se emplearon 20g de suelo seco y tamizado (partículas < 2mm), los cuales se mezclaron con 5mL de pirofosfato de sodio al 5% y 100mL de agua destilada. Se agitó la mezcla en una batidora eléctrica durante 15min y se trasvasó a un cilindro graduado

completando hasta 1L con agua destilada. Tapando el cilindro, se agitó la mezcla hasta resuspender todas las partículas de suelo. Luego de 48 segundos de dejar el cilindro en reposo, se tomó una alícuota de 50mL con una pipeta volumétrica, a 10cm por debajo de la superficie del agua. La alícuota se trasvasó a un vaso de precipitado de 100mL previamente pesado y se colocó en la estufa a 100°C hasta secar. Transcurridas 8 horas, se tomó una segunda alícuota y se procedió de igual manera. La proporción de los distintos tipos de partículas se obtiene con las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{Arena} = 100 - \% \text{Arcilla} - \% \text{Limo}$$

$$\% \text{Arcilla} = [(1000 \times \text{peso de la segunda alícuota}) / 50] \times (100 / 20)$$

$$\% \text{Limo} = [(1000 \times (\text{peso de la primera alícuota} - \text{peso de la segunda alícuota})) / 50] \times (100 / 20)$$

2.1.3 Densidad aparente y humedad del suelo: las muestras de suelo, luego de perder su contenido de agua (secadas 3 días a 80°C), fueron pesadas para calcular la masa por unidad de volumen (**Anderson e Ingram 1993**). Los resultados fueron expresados en g·cm<sup>-3</sup>. A partir del peso perdido por cada muestra, se calculó el contenido de agua (humedad) de las mismas.

2.1.4 Capacidad de campo: la capacidad de campo del suelo se determinó por gravedad, empleando 8g de suelo seco y tamizado, los cuales se agregaron a un papel de filtro Wattman #2 previamente saturado de agua. Luego se agregaron 10mL de agua destilada y se recolectó en un cilindro graduado el excedente. La cantidad de agua retenida por el suelo constituye su capacidad de campo. Los resultados fueron expresados en mLH<sub>2</sub>O·100gsuelo<sup>-1</sup>.

2.1.5 Determinación de pH: Se empleó una suspensión suelo:agua en una relación 1:2,5. Para ello se emplearon 6g de suelo seco y tamizado (partículas <2mm) y 15mL de agua destilada. La

suspensión se agitó durante 30 minutos para luego de 30 minutos más de reposo, medir el pH con electrodo de vidrio (**Allen y col., 1974**).

2.1.6 Nitrógeno total del suelo y la hojarasca: se empleó la técnica de oxidación de Kjeldahl (**Bremmer, 1965**) utilizando 0,2g (peso seco) de suelo tamizado (partículas <2mm). En el caso de la hojarasca se emplearon 0,05g de peso seco. En ambos casos se trató con ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) durante 2 horas a una temperatura de 360 °C. El extracto se destiló y tituló con HCl 0,01M empleando un indicador a base de rojo metilo y verde bromocresol. Por último, se calculó el contenido de nitrógeno a partir de la siguiente fórmula:

$$\%N = (\text{valoración del destilado} - \text{valoración del blanco}) \times \text{Molaridad del HCl} \times (1,4/\text{peso de la muestra})$$

2.1.7 Fósforo disponible del suelo: El fósforo disponible se extrajo de acuerdo al método de **Olsen y Sommers** (1982) empleando 2g de suelo y 15 mL de solución de NaHCO<sub>3</sub> 0,5M (pH 8,5). En el extracto, el contenido de P se determinó por colorimetría con azul de molibdeno. Se transfirieron 6mL del extracto a balones aforados de 25mL. Se agregaron 3 gotas de p-nitrofenol y se ajustó el pH con NaOH y HCl 5M. Se agregaron 4mL del reactivo B y se completó con agua destilada hasta 25mL. Luego de desarrollado el color, se midió al absorbancia a 880nm.

Se calculó la cantidad de fósforo en  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  a través de la siguiente ecuación de la recta obtenida con los patrones:

$$Y = 0,0612X + 0,0493 \quad ; \quad r^2 = 0,9957$$

$$\text{De donde: } P(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = (\text{ABS}_{880\text{nm}} - 0,0493) / 0,0612 \cdot (15/2)$$



2.1.8 Capacidad de intercambio catiónico efectiva, cationes intercambiables (Ca, Mg, Na, K, Al y H) y porcentaje de saturación de bases: La determinación de los cationes intercambiables se realizó a partir de la extracción con acetato de amonio 1M a pH 7.0 (**Anderson e Ingram, 1993**) y determinación de la concentración por espectrofotometría de absorción atómica. La determinación de H y Al intercambiable: se realizó por el método de cloruro de potasio, modificado de Hopkins y col. Los resultados fueron expresados en  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . A partir de estos valores se obtuvo la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y el porcentaje de saturación de bases (SB) de acuerdo a la ecuación:

$$\text{CICE} = \sum \text{concentración de cationes intercambiables}$$

$$\text{SB} = ((\sum \text{cationes básicos})/\text{CICE}) * 100$$

## 2.2 **Análisis químicos de los indicadores de cambios en la dinámica y cantidad de carbono.**

2.2.1 Fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo: se empleó la técnica de flotación de agua descrita por **Anderson e Ingram** (1993), la cual permite separar la materia orgánica en sus fracciones ligera y pesada. La separación de las fracciones del suelo, ocurre de acuerdo a la diferencias de densidad de las partículas respecto al medio líquido donde ocurre la separación. Aquella fracción de menor densidad (fracción ligera), flota en el líquido de separación y es separada del resto filtrándola a través de un tamiz de 0,25mm de luz. Se emplearon alrededor de 250g de suelo seco y tamizado (partículas <2mm) y suficiente agua para separar las fracciones. Una vez separadas, las fracciones se trasvasaron a envases plásticos previamente pesados y se pusieron a secar a 40°C.

2.3.2 Carbono orgánico total del suelo y la hojarasca: se empleó el método de digestión húmeda con dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) al 8% y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentrado (**Vance y col., 1987**). Para ello se pesaron 0,5g de suelo seco y tamizado (partículas <2mm). En el caso de la hojarasca, se

emplearon 0,05g de peso seco. En ambos casos, se agregó 2mL de  $K_2Cr_2O_7$  y 3mL de  $H_2SO_4$ . Luego de enfriarse la solución se agregaron 10mL de agua destilada y se agitaron las muestras. Transcurridas 24 horas, se midió la absorbancia del sobrenadante a 650nm en un Spectronic marca UNICO. La determinación por muestra se hizo por triplicado. El porcentaje de CO se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\%CO = (Kp \times Am \times 0.1) / (M \times 0.74)$$

Donde Kp es el promedio de las constantes de cada solución patrón en la curva de calibración y se obtiene dividiendo la concentración de la solución patrón ( $mg \cdot mL^{-1}$ ) entre su valor de absorbancia a 650nm; Am es la absorbancia de la muestras; el valor 0,1 =  $g \text{ CO} \times 100\% / 1000 \text{ mg}$ ; M es el peso exacto de la muestra de suelo en gramos y 0,74 representa el porcentaje de CO que se extrae con esta metodología.

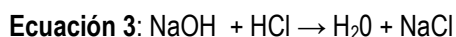
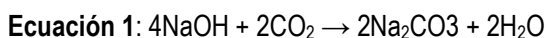
2.3.2 Carbono de la FL y la FP de la materia orgánica del suelo: El carbono de la FL y FP se determinará de acuerdo al método de digestión húmeda con dicromato ( $K_2Cr_2O_7^{-2}$ ) y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), ya descrito (**Vance y col., 1987**).

2.3.3 Materia orgánica del suelo (MOS): Por medio del factor de Van Bemmelen (1,724) se expresaron los valores de CO a materia orgánica, de la siguiente manera:

$$\%MOS = \%CO \times 1,724$$

2.3.4 Respiración basal: se emplearon 25g (peso seco) de suelo fresco (refrigerado) y tamizado (partículas  $<2mm$ ) los cuales se colocaron en envases de plástico de 40mL de capacidad. El suelo fue llevado al 50% de su capacidad de campo, la cual fue calculada para cada estrato. En envases de las mismas dimensiones se colocaron 10mL de NaOH 0,5M. Ambos envases

fueron colocados en un recipiente de vidrio los cuales fueron cerrados herméticamente e incubados en oscuridad a temperatura constante de 27°C (modificado de **Alef y Nannipieri, 1995**). La captura de CO<sub>2</sub> en el álcali ocurre de acuerdo al ecuación 1. Transcurridos 1, 3, 7, 12, 24, 52, y 120 días se retiraron los envases con NaOH de las cámaras y se agregó 1mL de BaCl<sub>2</sub> lo cual genera la formación de carbonato proporcional al CO<sub>2</sub> fijado (ecuación 2). Se sustituyeron los envases de álcali con NaOH nuevo hasta cumplir los 120 días. El NaOH remanente se valoró utilizando HCl 0,5M y fenolftaleína como indicador (ecuación 3).



La cantidad de CO<sub>2</sub> formado durante el período transcurrido se calcula utilizando la fórmula siguiente:

$$\text{mgCO}_2 \cdot 100 \text{gsuelo}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} = (\text{mL HClblanco} - \text{mL HClmuestra}) \times \text{Molaridad} \times 22 \times (10/2) \times (100/25) \times (\text{g suelo seco/g suelo humedo})/\text{horas}.$$

A partir de estos resultados se calculó la cantidad de CO<sub>2</sub> acumulada durante la serie temporal.

2.3.5 Contenido de carbono soluble: a 20,00 g de suelo seco y tamizado (partículas <2mm) se les agregó 30mL de agua destilada. La suspensión se colocó en agitación durante 30 minutos y el sobrenadante fue centrifugado a 5000rpm durante 30 minutos. Una alícuota de entre 5mL y 10mL del centrifugado fue empleada para la determinación del contenido de carbono por el método de digestión húmeda con dicromato (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-2</sup>) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (**Vance y col., 1987**). La determinación por muestra se hizo por triplicado.

2.3.6 Contenido de carbono microbiano: Se determinó por el método de la fumigación extracción (**Vence y col., 1987**), el cual consta de tres fases: fumigación con cloroformo libre de etanol,

extracción con  $K_2SO_4$  0,5M y determinación analítica del carbono de la biomasa microbiana. La fumigación con cloroformo provoca la muerte de las células microbianas por la rotura de las membranas celulares, con lo que el contenido citoplasmático de las células microbianas es vertido al suelo de donde puede ser extraído con 40mL de  $K_2SO_4$  0,5M agitando durante 1 hora. Para la valoración se emplean 8mL del extracto junto a 2mL de  $K_2Cr_2O_7$  66,7mM, 70mg de HgO y 15mL de una mezcla ácida (2/3 partes de  $H_2SO_4$  y 1/3 parte de  $H_3PO_4$ ). La mezcla se coloca a digestión durante 30min a 150°C. Luego de enfriar se titula con sulfato amónico ferroso 33mM empleando como indicador 1,10fenantrolina-ferrosa 25mM. La determinación por muestra se hizo por triplicado. La cantidad de carbono se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$C_{mic} = (CO \text{ fumigado} - CO \text{ no fumigado}) / K_{ec}$$

Donde  $K_{ec} = 0,38$ , es una constante calculada a partir de la correlación de los resultados obtenidos en doce suelos con el método de fumigación incubación y método de fumigación y extracción.

Para esta determinación se emplearon 5g de suelo en cada réplica a una humedad de 50% de su capacidad de campo, permaneciendo en cámara de fumigación con cloroformo durante 5 días.

2.3.7 Coefficientes metabólicos (q): Se calcularon tres índices o coeficientes indicadores del metabolismo y la eficiencia de los procesos de mineralización de carbono. El coeficiente  $qC_{mic}$  se calculó como la fracción de la cantidad de carbono microbiano entre la cantidad de carbono total, e indica cuanto del carbono total es incorporado a la biomasa microbiana. El coeficiente  $qCT$  es calculado como  $CO_2/CT$ , e indica cuanto del carbono total está siendo mineralizado. Por su parte el  $qCO_2$  está definido como la tasa de respiración de los microorganismos por unidad de biomasa. Este coeficiente indica la eficiencia en la adquisición de carbono orgánico y la intensidad de la mineralización de

carbono (Dilly y col., 1997). Se calculó dividiendo la cantidad promedio de CO<sub>2</sub> detectado durante la respiración basal entre el carbono de la biomasa microbiana.

### **3. Análisis estadísticos.**

Los análisis estadísticos permitieron evaluar la significación de las observaciones. Se hicieron comparaciones a dos niveles: tipo de vegetación (sabana y bosque) y profundidad (E1, E2 y E3). En estos casos el número de muestra utilizado por horizonte fue de 6 (muestras compuestas), para un total de 18 por zona. En los casos en los que se realizaron comparaciones solo al nivel de tipo de vegetación, el número de muestras varió según la variable estudiada. El nivel de significación estadística fue 0,05 en todos los casos, y se empleó el programa estadístico Statistic 7.

Se aplicó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis (K-W) para las variables: carbono total, carbono de la fracción pesada, carbono de la fracción ligera, porcentaje de materia orgánica, carbono soluble, carbono microbiano, fracción pesada, fracción ligera, textura, nitrógeno total, fósforo disponible, coeficiente metabólico, capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiables y porcentaje de saturación de bases. Se aplicó ANOVA de dos vías para las variables: densidad aparente, pH, capacidad de campo, porcentaje de humedad y relación carbono-nitrógeno del suelo.

Para aquellas variables de un solo nivel de comparación, como: biomasa de hojarasca y respiración edáfica, se empleó la prueba no paramétrica de Man Whitney (M-W). Para la respiración basal se añadió un nivel de comparación adicional, el tiempo. En este caso se empleó un ANOVA de medidas. Se aplicó la prueba de Tukey HSD para determinar los pares con diferencias significativas. Se empleó la técnica de ordenación por componentes principales para visualizar la dirección de cambios sugeridos a partir de los datos actuales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 1. Caracterización física y química de los horizontes determinados

#### 1.1 Textura

A diferencia de otras propiedades físicas del suelo, la textura es una característica permanente que brinda información acerca de la fertilidad, drenaje y aireación del suelo. Así, suelos con predominio de arenas (proveniente del mineral cuarzo) son considerados suelos más jóvenes y menos fértiles que los suelos con predominio de arcillas. La clasificación textural nos permite comparar el grado de meteorización de los suelos así como inferir acerca de los procesos formadores del mismo.

La clasificación textural para la sabana y el bosque evaluados fue la misma. Los horizontes A presentaron textura arenosa, y los B textura areno-francosa (Tabla 5). Al hacer la discriminación a nivel de porcentajes, no se encontraron diferencias entre zonas pero sí entre horizontes para todos los tamaños de partículas (K-W;  $p < 0,05$ ). El porcentaje de arcilla y limo aumenta con la profundidad indicando un lavado de estos minerales y acumulación en Bt2.

Entre la arena, el limo y la arcilla, a ésta última se le ha atribuido importantes influencias sobre las características del suelo, tales como la estructura, porosidad, estabilidad de los microagregados formados y capacidad efectiva de intercambio catiónico (**Palm y col. 2007**). Esta particularidad deriva de su mayor superficie específica (área por unidad de peso) en comparación con las arenas y limos, lo cual permite retener una mayor cantidad de nutrientes, agua y facilita la formación de agregados con el carbono, protegiéndolo de la acción química y microbiana. Trabajos realizados por **Franzluebbbers y col.** (1998) sugieren que las bacterias del suelo se desarrollan mejor en suelos con textura arcillosa que en suelos arenosos debido a que éstos ofrecen mayor

superficie de protección contra depredadores, mejor condición nutricional, de humedad y mayor acceso al carbono.

**Campos** (1999) comparó varias propiedades del suelo entre un sistema forestal de pinos en Uverito (Edo. Monagas) y una sabana de *Trachypogon sp.*, encontrando las mismas clases texturales que el presente trabajo para tres y cuatro horizontes identificados, respectivamente, en un perfil de 106cm de profundidad. Además, consideró que la variación del porcentaje de arena con la profundidad de un 3,20% a un máximo de 10,00%, puede favorecer la retención de agua y su disponibilidad para las raíces de los árboles.

**Tabla 5.** Porcentajes de arena, arcilla y limo promedio para cada horizonte del suelo de la sabana (S) y del suelo del bosque de *A. mangium* (B). Se incluye clase textural y promedios generales por zona.

	Horizonte	Arena		Arcilla		Limo		Textura
		%	ES	%	ES	%	ES	
Bosque	A	92,64(a)	0,53	3,27(a)	0,24	4,09(a)	0,29	Arenosa
	Bt1	90,05(b)	0,98	5,85(b)	0,51	4,10(b)	0,58	Areno-Francosa
	Bt2	85,08(c)	1,52	9,72(c)	1,28	5,21(c)	0,31	Areno Francosa
	<b>Media B</b>	<b>89,26</b>	<b>0,42</b>	<b>6,28</b>	<b>0,31</b>	<b>4,47</b>	<b>0,16</b>	
Sabana	A	90,83(a)	0,21	4,46 (a)	0,11	4,74(a)	0,15	Arenosa
	Bt1	89,50(b)	0,20	6,55 (b)	0,13	3,95(b)	0,09	Areno Francosa
	Bt2	81,44(c)	0,85	13,00(c)	0,68	5,56(c)	0,24	Areno Francosa
	<b>Media S</b>	<b>87,26</b>	<b>1,01</b>	<b>8,00</b>	<b>0,69</b>	<b>4,75</b>	<b>0,41</b>	

Letras en paréntesis indican diferencias significativas entre horizontes y entre zonas (K-W,  $p < 0,05$ ).

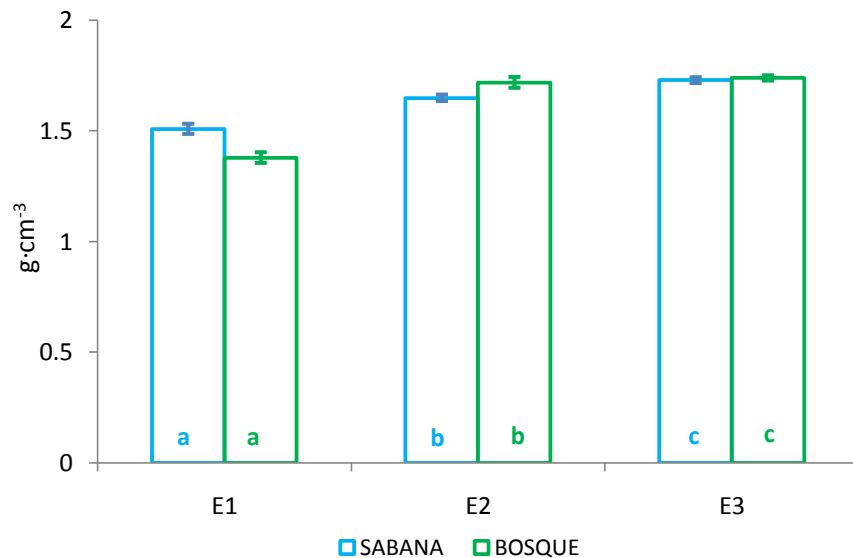
ES: error estándar.  $n_S=18$ ,  $n_B=18$ .

## 1.2 Densidad Aparente

La densidad aparente ( $D_a$ ) es uno de los índices estructurales más utilizados como indicadores del grado de agregación o estructura del suelo. Éste parámetro permite tener idea del espacio poroso del suelo que a su vez está relacionado con la proporción agua-aire del mismo. Los suelos ligeros, con alto contenidos de materia orgánica o carbonato de calcio generalmente presentan una  $D_a$  baja.

El efecto de la vegetación sobre la densidad aparente no fue significativo (Anova factorial,  $p < 0,05$ ). Las diferencias se apreciaron al nivel de profundidad (Fig. 9). El horizonte superficial de cada zona resultó menos

denso que los restantes, lo cual puede estar asociado a una mayor cantidad de materia orgánica y una menor compactación. De acuerdo con **Casanova** (2005), se considera que un valor ideal de  $D_a$  en suelos es 1,2 – 1,3  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , en el sentido que permite la difusión del aire y la penetración de las raíces. Los valores encontrados son superiores a éstos, típico de suelos arenosos de sabanas venezolanas y están alrededor del valor reportado para Guanipa (Edo. Anzoátegui) por el mismo autor (1,60  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), para el pinar en Uverito (1,48  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) y la sabana (1,45  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) por **Campos** (1999) y para horizontes superficiales de los llanos centrales del estado Guárico (1,61  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) por **Hernández-Valencia** (1996), (1,52-1,66  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) por **López-Hernández y col.** (2006) y (1,37-1,60  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) por **Hernández** (2010).



**Figura 9.** Densidad aparente en  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  del suelo bajo vegetación de sabana y bajo vegetación boscosa de *A. mangium*. Letras diferentes indican diferencia significativa (Anova factorial;  $p < 0,05$ ). Las barras verticales indican el error estándar de la media.  $n_s=9$ ,  $n_B=9$ .

Los resultados obtenidos para este parámetro sugieren que el cambio del tipo de vegetación en la sabana no se ha traducido en modificaciones estructurales del suelo. La naturaleza permanente de estas características hace pensar que el tiempo transcurrido desde la aforestación no ha sido suficiente para generar cambios detectables.



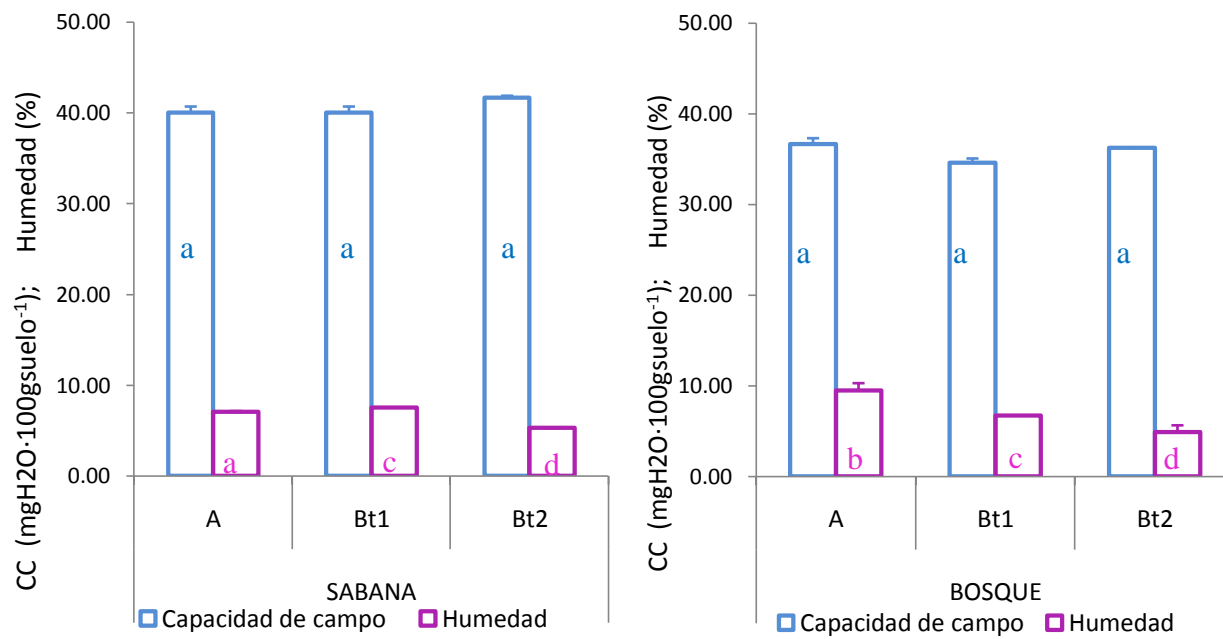
### 1.3 Capacidad de campo y humedad del suelo

La capacidad de campo (CC) es una constante de humedad del suelo que indica la cantidad de agua máxima que puede ser retenida por adhesión y cohesión por las partículas de suelo (**Casanova, 2005**). El porcentaje de humedad del suelo está íntimamente relacionado con la CC y es indicativo del estado hídrico del suelo, consecuencia de las condiciones microclimáticas del mismo.

La CC observada es similar en ambas zonas y para todos los horizontes (Anova factorial;  $p > 0,05$ ), siendo el promedio general (media  $\pm$ DE) de  $37,82 \pm 5,56 \text{ mgH}_2\text{O} \cdot 100\text{gsuelo}^{-1}$ . Éste valor de CC indica que este suelo es capaz de retener alrededor de 1/3 de su peso en agua, valor que para texturas arenosas es considerado bastante alto. En general, se espera que la capacidad de los suelos en retener agua sea mayor en suelos más ricos en arcilla y materia orgánica. Sin embargo, los valores de CC reportados por **López-Hernández y col.** (2006) para suelos de la Estación Biológica de los Llanos (Edo. Guárico), con contenido de arcilla (22,5-25,3%) superiores al de los suelos de este estudio, fueron inferiores al de este estudio ( $16,5\text{-}15,0 \text{ mgH}_2\text{O} \cdot 100\text{gsuelo}^{-1}$ ). Por su parte, **Rojas** (2006) reportó para el horizonte superficial de la localidad de El Sombrero (Edo. Guárico) una CC de  $52,5 \text{ mgH}_2\text{O} \cdot 100\text{gsuelo}^{-1}$  asociado a un 19,8% de contenido de arcilla.

Las diferencias en el contenido de humedad del suelo si fueron significativas. En el bosque la humedad del suelo decrece con la profundidad, mientras que en la sabana la humedad es igual en todos los horizontes (Fig. 10). Por otra parte, el horizonte superficial del bosque contiene mayor porcentaje de humedad que la superficie del suelo en la sabana (Anova factorial;  $p < 0,05$ ), lo cual va acorde a las condiciones microclimáticas contrastantes en ambas zonas (temperatura, humedad relativa, cobertura vegetal, cantidad de hojarasca, entre otras).

Si bien la CC no fue significativa, las condiciones hídricas del suelo parecen conservarse mejor en el bosque, llegando a tener en su superficie alrededor del 30% de su capacidad máxima de retención de agua.



**Figura 10.** Capacidad de campo (CC) y porcentaje de humedad del suelo bajo vegetación de sabana y del suelo bajo vegetación boscosa de acacia. Letras diferentes indican diferencias significativas (Anova factorial;  $p < 0,05$ ) entre sistemas y entre horizontes. Las barras verticales indican el error estándar de la media.  $n_s=9$ ,  $n_B=9$ .

#### 1.4 pH

El pH es uno de los parámetros que más se utiliza en el análisis del suelo dado que interfiere con los procesos biológicos que en él ocurren. La actividad microbiana puede verse mermada a pH fuertemente ácidos, la disponibilidad de macroelementos nutritivos esenciales para el crecimiento y la producción vegetal disminuye, y además los riesgos de toxicidad por aluminio y manganeso aumentan.

Se encontraron diferencias entre horizontes y entre tipo de vegetación (Tabla 6). El pH disminuye con la profundidad siendo en el bosque significativamente más ácido que en la sabana (Anova factorial,  $p < 0,05$ ). Suelos con valores de pH como los obtenidos son clasificados como fuertemente ácido (Casanova, 2005). Los suelos de las sabanas venezolanas suelen ser ácidos con valores entre 5,40 y 4,10 (Rojas y Adams, 1980 citado en Casanova, 2005). Los valores promedios de pH encontrados en este estudio para la sabana (media  $\pm$ DE)

(4,460±0,186) y para el bosque (3,860±0,254) resultaron menores al límite inferior del intervalo de variación reportado para sabanas venezolanas.

**Tabla 6.** pH del suelo bajo vegetación de sabana y bajo vegetación boscosa de *A. mangium*, determinado en agua a una relación 1:2,5. Letras diferentes indican diferencias significativas (Anova factorial;  $p < 0,05$ ) entre sistemas y entre horizontes.

		pH	ES
Sabana	A	4,66(a)	0,03
	Bt1	4,42(b)	0,04
	Bt2	4,30(c)	0,04
	<b>Media S</b>	<b>4,46</b>	<b>0,04</b>
Bosque	A	4,14(d)	0,02
	Bt1	3,77(e)	0,01
	Bt2	3,67(f)	0,03
	<b>Media B</b>	<b>3,86</b>	<b>0,06</b>

ES: error estándar;  $n_s=18$ ,  $n_B=18$ .

La acidificación de los suelos causada por el reemplazo de la vegetación de sabana por especies forestales ha sido reportada por **Pomenta y López- Hernández** (1985) para las plantaciones de *Pinus caribaea* y *Eucalyptus* sp. Ellos encontraron que en plantaciones de nueve años de edad ubicadas en Uverito (Edo. Monagas), el pH disminuyó 0,32 unidades, pasando de 4,81 a 4,49 a nivel superficial (0-15cm). En esta misma publicación, plantaciones de siete años de edad mostraron acidificación a todos los intervalos de profundidad evaluados (hasta 120cm de profundidad) respecto a la sabana testigo. Estos autores consideran que dicho aumento en la acidez fue ligero. **Yamashita y col.** (2007) reportaron la acidificación del suelo por el establecimiento de *A. mangium* en Indonesia, y aunque el pH encontrado por estos autores no fue menor a 4, la variación respecto a un bosque secundario de *Imperata cylindrica* fue cercano a 1 unidad de pH.

En este caso, la plantación de acacia ha acidificado el suelo de la sabana en 0,52 unidades de pH para el horizonte A, 0,65 unidades para el horizonte Bt1 y 0,63 unidades para el horizonte Bt2. El pH promedio para la sabana y el bosque es de 4,46 y 3,86 respectivamente, para una variación neta de 0,60 unidades en diez años.

Esta variación es bastante importante y puede tener efecto inmediato sobre la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes, sobre todo del fósforo.

## 1.5 Nitrógeno total y fósforo disponible

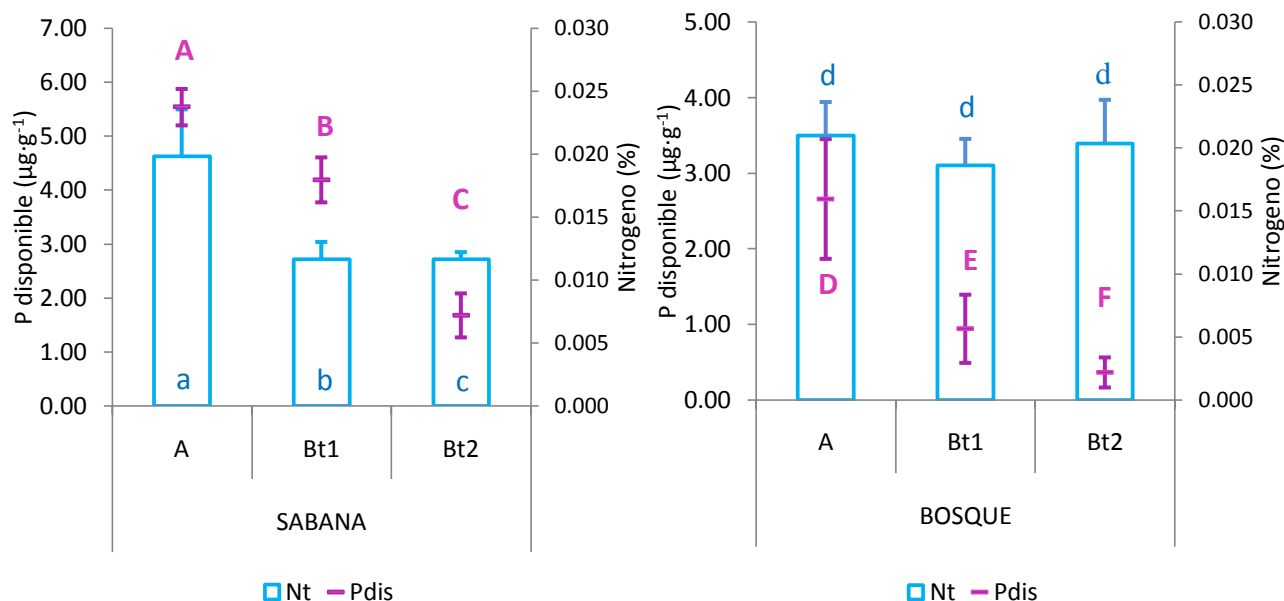
### 1.5.1 Nitrógeno

El nitrógeno es un nutrimento esencial en el crecimiento y producción de las plantas y animales, forma parte importante de la estructura de las proteínas (los aminoácidos), incluyendo las enzimas. De allí que las cantidades de nitrógeno tengan influencia en las tasas de descomposición y por lo tanto en la acumulación de materia orgánica y el ciclo del carbono (**Brady, 1996**)

El tipo de vegetación tuvo efecto sobre los niveles de nitrógeno encontrados entre la sabana y el bosque, siendo superiores en el bosque (K-W;  $p < 0,05$ ). Solo en la sabana, el porcentaje de nitrógeno disminuye significativamente con la profundidad (entre 0,020 y 0,012%) mientras que en el bosque (entre 0,021 y 0,020%) se mantiene similar (Fig. 11). En sistemas naturales, las cantidades de nitrógeno contenidas en la fracción mineral del suelo oscilan entre 0,02 y 0,50%, mientras que en sistemas cultivados está alrededor del 0,15% (**Brady, 1996**).

El resultado obtenido refleja un aumento de los niveles de nitrógeno del suelo luego de la aforestación con *A. mangium*. El hecho de que los horizontes en el bosque tengan cantidades de nitrógeno similares hace pensar que ha habido una homogenización posiblemente promovida por la simbiosis de *A. mangium* con organismos fijadores de nitrógeno. Ésta interacción ocurre en las raíces, de manera que hay un aporte de nitrógeno directo a los horizontes subsuperficiales. Sin embargo, no puede descartarse el aporte a través de la descomposición de la hojarasca, la cual debe ser rica en nitrógeno dado su naturaleza de leguminosa, en comparación con la cantidad de nitrógeno presente en la hojarasca de *T. spicatus*. Este nitrógeno orgánico incorporado a la superficie del suelo, podría traslocarse hasta horizontes más profundos, lo cual es factible dada la textura arenosa del suelo.

Aún así, los valores obtenidos para el suelo del bosque se corresponden con los bajos niveles nutricionales reportados para sabanas venezolanas (Tabla 7).



**Figura 11.** Nitrógeno total (Nt) y fósforo disponible (Pdis) del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de *A. mangium*. Letras diferentes indican diferencias significativas (K-W;  $p < 0,05$ ) entre sistemas y entre horizontes. (mayúsculas para Pdis y minúsculas para Nt). Las barras verticales indican el error estándar de la media.  $n_s=18$ ,  $n_B=18$ .

### 1.5.2 Fósforo disponible

El fósforo es un componente esencial de los compuestos orgánicos ya que forma parte de la llamada “moneda energética” de las células vivas, el ATP (adenosin trifosfato). Además forma parte importante en la estructura del ADN, del RNA y de fosfolípidos que integran las membranas celulares. Dada la importancia de éste elemento en los seres vivos, la limitación del mismo afecta su desarrollo. En las plantas, el P estimula el desarrollo del sistema radical, favorece la floración, fructificación y maduración además de estimular la fijación de nitrógeno (Brady, 1996; Taiz y Zeiger, 2002).

Los niveles de fósforo disponible fueron superiores en la sabana (K-W;  $p < 0,05$ ) y tanto en sabana como en bosque disminuyen con la profundidad (Fig. 11), encontrándose diferencias significativas entre horizontes a la misma profundidad. La disminución de los niveles de fósforo en el suelo del bosque puede responder al rápido crecimiento de acacia, lo cual genera una mayor demanda de P en comparación con las especies de la sabana. Adicionalmente, por ser acacia una leguminosa, presenta una mayor demanda de P para la fijación simbiótica de nitrógeno (Brady, 1996) lo cual repercute en la disminución observada. Era posible que la mayor acumulación de hojarasca en el bosque compensara la pérdida de P en el suelo producto de su utilización en el crecimiento vegetal, pero esto solo puede ocurrir si la descomposición de este material vegetal ocurre a una mayor velocidad de lo que es tomado el P por las raíces de acacia.

**Tabla 7.** Valores de nitrógeno promedios para suelos bajo vegetación de *Trachypogon sp.* y suelos bajo vegetación de *A. mangium*.

	Ubicación	Horizontes/ Profundidad(cm)	Nt (mg·kg <sup>-1</sup> )	Trabajo
Sabana <i>Trachypogon sp.</i>	Uverito Edo. Monagas Venezuela	0-5	226,0	Campos (1999)
		5-10	283,0	
Bosque de <i>Acacia sp.</i>	Brasil	0 a 4-6	1500	Garay y col. (2004)
		4-6 a 14-16	1100	
Bosque <i>Acacia mangium</i>	Indonesia	0-15	1600*	Yamashita y col. (2008)
		15-30	850*	
Sabana P <i>Trachypogon sp.</i>	EBL Edo. Guárico Venezuela	0-10	234,3	Hernández (2010)
		10-20	180,2	
		20-30	158,2	
Sabana NP <i>Trachypogon sp.</i>		0-10	185,8	
		10-20	113,1	
		20-30	109,6	
Sabana** <i>Trachypogon plumosus</i>	El Tigre Edo. Anzoátegui Venezuela	A (0-16)	198,0	En este trabajo (2010)
		Bt1 (16-35)	116,0	
		Bt2 (35-105)	116,0	
Bosque** <i>Acacia mangium</i>		A (0-20)	210,0	
		Bt1 (20-40)	186,0	
		Bt2 (40-105)	204,0	

Nt: Nitrógeno total, P: protegida del fuego, NP: no protegida del fuego, EBL: Estación biológica de Los Llanos.

\*Promedio. \*\* $n_S=18$ ,  $n_B=18$ .

Por otra parte, cuando el pH del suelo es ácido, se generan cargas positivas en la superficie de las partículas coloidales del suelo, especialmente en la fracción de arcilla, lo que permite la retención de aniones como el fósforo en forma de fosfato. Bajo esta condición, el fósforo no es aprovechable por las plantas a menos que sea intercambiado por otro anión de la solución del suelo. La solubilidad del P en suelos fuertemente ácidos puede verse también reducida por su asociación con elementos como el hierro, el aluminio y el manganeso, lo cual lo hace no disponible (**Brady, 1996; Marschner, 1986**). En particular, en los árboles de acacia del área estudiada, no se observaron coloraciones de las hojas indicativas de deficiencias nutricionales y por el contrario la maduración de la semilla ya había ocurrido (se observó caída de las mismas al suelo en el campo).

#### **1.6 Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), cationes intercambiables y porcentaje de saturación de bases.**

La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) se refiere a la cantidad de cationes que pueden ser retenidos por las partículas de suelo en forma intercambiable, y que representan las cargas permanentes del suelo, originadas por el proceso de sustitución isomórfica (**Casanova, 2005**). El porcentaje de saturación de bases (SB) representa la proporción de la CICE ocupada por cationes básicos.

En general, la CICE y el SB no resultaron diferentes entre la sabana y el bosque (Tabla 8). Es importante destacar que el porcentaje restante al SB se corresponde a la porción ocupada por cationes ácidos, tales como protones y aluminio. En estos suelos, esa proporción representa un poco más del 50%, lo cual justificaría los bajos valores de pH registrados. Los resultados indican que las concentraciones de aluminio han aumentado a nivel superficial en el suelo del bosque, contribuyendo a la acidificación del suelo, mientras que la concentración de protones a esta profundidad se ha mantenido similar. Sin embargo, el patrón mostrado por la acidez total en cada sistema (Tabla 8) no explica del todo la disminución de pH encontrada con la profundidad y entre sistemas. Solo a nivel superficial se puede apreciar que la acidez total es mayor en el bosque, siendo el aluminio quien contribuye en mayor proporción. Esta no correspondencia entre los componentes de la acidez y el pH no pudo ser

explicada y podría ser consecuencia de la alta variabilidad entre muestras. Sin embargo, al calcular el porcentaje de cationes ácidos, por diferencia con el porcentaje de SB, se observa que en la sabana dicha concentración aumenta con la profundidad (A=36,98%; Bt1= 61,8%; Bt2= 76,8%), mientras que en el bosque disminuye (A=53,51%; Bt1= 45,01%; Bt2= 60,8%).

En el caso de las bases cambiables, solo en la sabana se detectaron diferencias con la profundidad. Tal fue el caso para el magnesio, el aluminio, la acidez total y el SB (Tabla 8). El magnesio y el SB disminuyen con la profundidad, mientras que el aluminio y la acidez total aumentan. En todos los casos, la variación puede ser atribuida a que en los horizontes más superficiales hay una mayor absorción de cationes básicos por las raíces de las plantas, de manera que la concentración de cationes ácidos totales es mayor y el SB menor. En el bosque, esta absorción se presume uniforme en todos los horizontes, dado que el sistema radical de *A. mangium* penetra a mayor profundidad en el suelo.

Del total de bases determinadas, la proporción en la cual se encuentran cambia entre la sabana y el bosque: en la sabana el orden es Mg>Ca>Na>K, mientras que en el bosque Ca>Mg>Na>K. Considerando que los valores deseables en suelos fértiles concuerdan con que Ca>Mg>K>Na en los sitios de intercambio y que a su vez el Ca represente entre 65 y 75% del total de bases (**Casanova, 2005**), los suelos de este estudio presentan condiciones de poca fertilidad ya que el porcentaje de Ca para la sabana y el bosque es de 42,45% y 37,73% respectivamente.

En general, la cantidad de cationes es baja y la suma de cationes totales resultó similar entre sistemas (K-W;  $p>0,05$ ). La CICE y el SB tanto en el bosque como en la sabana son superiores a los encontrados por **Campos** (1999) para el pinar. **Yamashita y col.** (2008) encontraron una CICE de  $6 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  y un SB de 35% para los primeros 30cm de suelo bajo plantaciones de *A. mangium*. Los suelos de este estudio presentaron mayor porcentaje de SB, lo que indica menor pérdida de cationes y menor concentración de cationes ácidos, mientras que la menor CICE indica que éstos son suelos más pobres.



**Tabla 8.** Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), cationes intercambiables y porcentaje de saturación de base para los horizontes bajo vegetación de sabana y bajo vegetación boscosa de *A.mangium*.

		Cmol·kg <sup>-1</sup>									
		Ca	Mg	K	Na	∑cationes básicos	Al	H	Acidez total	CICE	SB
SABANA	E1	0,18 a,A (0,01)	0,36 a,A (0,02)	0,01 a,A (0,00)	0,05 a,A (0,01)	0,61 a,A (0,04)	0,05 a,A (0,03)	0,31 a,A (0,00)	0,35 a,A (0,03)	0,96 a,A (0,03)	63,02 a,A (3,02)
	E2	0,21 a,A (0,07)	0,12 b,A (0,03)	0,03 a,A (0,00)	0,03 a,A (0,01)	0,38 a,A (0,10)	0,14 a,A (0,05)	0,39 a,A (0,06)	0,53 a,A (0,02)	0,91 a,A (0,10)	38,13 a,A (6,90)
	E3	0,17 a,A (0,05)	0,10 c,A (0,02)	0,03 a,A (0,01)	0,02 a,A (0,00)	0,31 a,A (0,08)	0,51 c,A (0,04)	0,43 a,A (0,02)	0,94 b,A (0,03)	1,25 a,A (0,10)	23,14 b,A (4,14)
	<b>Media*</b>	<b>0,18 A (0,02)</b>	<b>0,15 A (0,02)</b>	<b>0,03 A (0,00)</b>	<b>0,03 A (0,00)</b>	<b>0,39 A (0,04)</b>	<b>0,39 A (0,04)</b>	<b>0,42 A (0,02)</b>	<b>0,81 A (0,04)</b>	<b>1,59 A (0,04)</b>	<b>24,09 A (3,40)</b>
BOSQUE	E1	0,23 a,A (0,09)	0,08 b,B (0,01)	0,02 a,A (0,00)	0,15 a,A (0,06)	0,47 a,A (0,15)	0,40 a,B (0,05)	0,21 a,A (0,02)	0,61 a,B (0,06)	1,08 a,A (0,17)	39,21 a,A (6,90)
	E2	0,12 a,A (0,04)	0,17 b,A (0,04)	0,14 a,A (0,05)	0,06 a,A (0,01)	0,49 a,A (0,03)	0,16 a,A (0,04)	0,24 a,B (0,03)	0,43 a,A (0,02)	0,89 a,A (0,03)	54,99 a,A (1,77)
	E3	0,17 a,A (0,04)	0,15 b,A (0,03)	0,02 a,A (0,00)	0,06 a,A (0,02)	0,40 a,A (0,08)	0,19 a,B (0,10)	0,29 a,B (0,02)	0,49 a,B (0,11)	0,88 a,A (0,03)	46,49 a,A (9,65)
	<b>Media*</b>	<b>0,17 A (0,02)</b>	<b>0,15 A (0,01)</b>	<b>0,04 A (0,02)</b>	<b>0,08 B (0,02)</b>	<b>0,43 A (0,04)</b>	<b>0,22 A (0,03)</b>	<b>0,27 A (0,01)</b>	<b>0,50 A (0,03)</b>	<b>1,35 A (0,04)</b>	<b>30,98 A (2,88)</b>

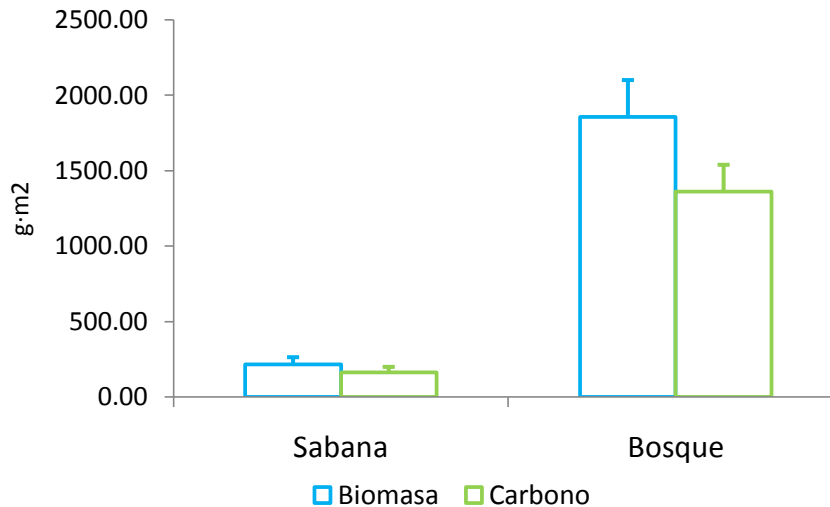
Ca: calcio, Mg: magnesio, K: potasio, Na: Sodio, Al: aluminio, H: hidrógeno, CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva, SB: porcentaje de saturación de base. Letras diferentes indican diferencias significativas (mayúsculas: entre horizontes bajo vegetación diferente, minúsculas: entre horizontes bajo igual vegetación) (K-W; p<0,05). Valores en paréntesis indican el error estándar de la media. \* media ponderada respecto a la profundidad de los horizontes que conforman el perfil.

Por su parte, **Garay y col.** (2004) reportaron valores de CICE y SB para suelo bajo plantaciones de *Acacia mangium* similares a los obtenidos en este estudio, sin embargo la concentración de cationes básicos (Ca, Mg, K y Na) fue mayor que la reportada en este estudio. Por otra parte, los resultados de este estudio no confirman la hipótesis planteada por **Yamashita y col.** (2008), quienes afirmaban que el rápido crecimiento y requerimiento mineral de *A. mangium*, agota los cationes del suelo, especialmente de calcio. Además, aunque no se detectaron diferencias en el contenido de Na al comparar pares de horizontes entre sistemas, el promedio ponderado del perfil resultó mayor en el bosque.

## **2. Indicadores de cambios en la dinámica y cantidad de carbono.**

### **2.1 Hojarasca**

La biomasa de hojarasca fue mucho mayor en el bosque de *A. mangium* (1855,34 g·m<sup>-2</sup>) que en la sabana (214,75 g·m<sup>-2</sup>). El espesor de la capa de hojarasca en el bosque es de alrededor de 10cm lo cual no solo constituye un compartimiento importante de acumulación de C sino que también constituye un reservorio de humedad, nutrientes y refugio de la fauna del suelo. En campo, se observó mayor actividad de la fauna edáfica del bosque, tales como escorpiones, pequeñas lagartijas y hormigas. La cantidad de carbono presente en la hojarasca por metro cuadrado, fue también superior para el bosque de *A. mangium* que para las especies de la sabana (Fig. 12). Las diferencias encontradas son un reflejo del mayor secuestro de carbono que está ocurriendo en la vegetación del bosque.



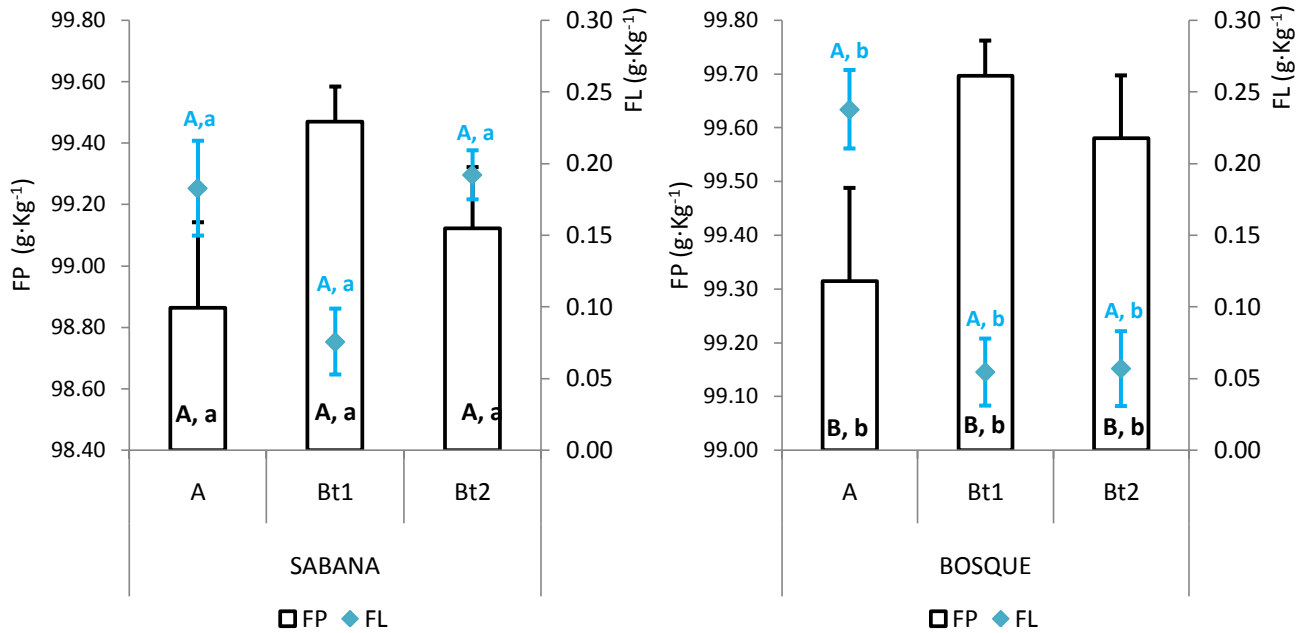
**Figura 12.** Biomasa y carbono de la hojarasca de la vegetación de sabana y de la vegetación boscosa de *A. mangium*. Todas las diferencias son significativas (M-W;  $p < 0,05$ ). Las barras verticales indican el error estándar de la media.  $n=10$ .

## 2.2 Fracción ligera (FL) y fracción pesada (FP) del suelo

De manera general, la fracción pesada del suelo en ambos sistemas representa la mayor proporción de la masa total de MOS mientras que la fracción ligera está poco representada en estos suelos. Esto es de esperarse dada la textura arenosa, su Da y el bajo volumen que ocupa la MOS. La FP contiene la MOS más humificada u oxidada asociada a las partículas del suelo. La FL es en sí, el contenido de MOS particulada, es decir está compuesta solo por material orgánico. Señalo esto porque no debe confundirse las fracciones del suelo con las fracciones de la materia orgánica. En este trabajo la cantidad de C asociada a estas dos fracciones del suelo será tratada en el apartado de carbono de la fracción ligera y carbono de la fracción pesada.

El contenido de FP del suelo del bosque es ligeramente superior al de la sabana (K-W;  $p < 0,05$ ), con promedio de  $99,53 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  y  $99,15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectivamente. Por su parte la FL se mantiene igual entre los sistemas encontrándose diferencias solo entre los horizontes del bosque (Fig. 13), donde a nivel superficial hay mayor

cantidad de FL que en horizontes más profundos, posiblemente reflejo de la acumulación de hojarasca y pequeñas raíces.



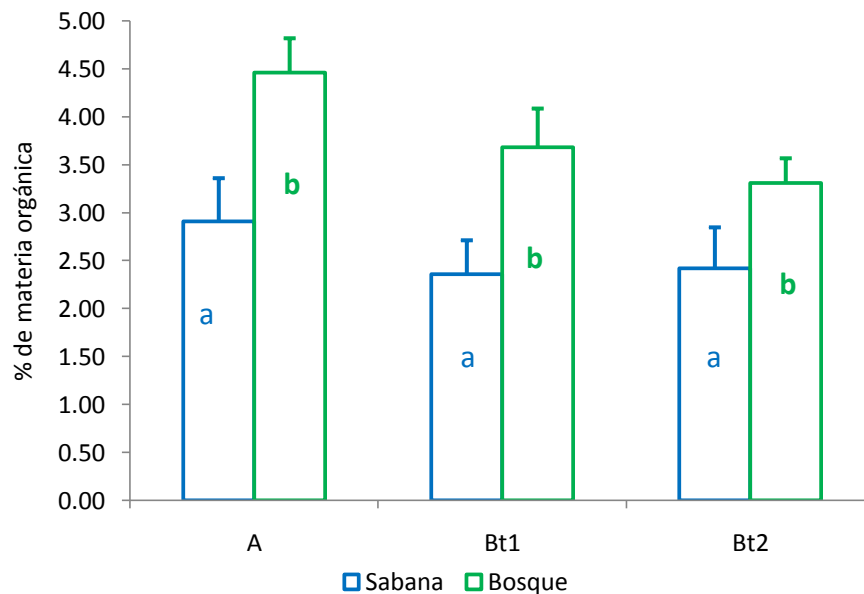
**Figura 13.** Fracciones del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de *A. mangium*. FP: fracción pesada, FL: Fracción ligera. Letras diferentes indican diferencias significativas (mayúsculas: diferencias entre sistemas; minúsculas: diferencias dentro de cada sistema). Las barras verticales indican el error estándar de la media.  $n_s=18$ ,  $n_B=18$ .

### 2.3 Materia orgánica

No se debe confundir la materia orgánica del suelo (MOS) con el material vegetal seco que se acumula sobre su superficie. La MOS forma parte del volumen del suelo y proviene de residuos vegetales (hojas, tallos, flores, frutos, raíces) y animales que luego sufren oxidación microbiana. Solo cuando el material vegetal ha sido transformado química o biológicamente, pasa a ser MOS. Aunque puede llegar a ser importante el aporte de residuos orgánicos al suelo, el contenido de MOS parece estar limitado al 5% del volumen del mismo,

considerándose suelos orgánicos al alcanzar estos altos porcentajes (Brady, 1996; Casanova 2005). En todo caso, la cantidad de MOS hace referencia a la calidad de los residuos orgánicos y el estado metabólico del suelo.

La cantidad de MOS fue mayor en el suelo bajo vegetación de acacia (K-W;  $p < 0,05$ ). El porcentaje de materia orgánica no varió con la profundidad para ninguno de los sistemas (Fig. 14). El promedio ponderado (media  $\pm$ ES) para la sabana fue de  $2,60 \pm 0,41\%$  y para el bosque  $3,60 \pm 0,34\%$ . El porcentaje de MOS obtenido es ligeramente superior al encontrado por Garay y col. (2004) en Brasil, para niveles superficiales del suelo bajo vegetación de *A. mangium* ( $\sim 2,5\%$ ).



**Figura 14.** Contenido de materia orgánica del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de *A. mangium*. Letras diferentes indican diferencias significativas (K-W;  $p < 0,05$ ) entre sistemas y entre horizontes. Las barras verticales indican el error estándar de la media.  $n_s=18$ ,  $n_B=18$ .

A pesar de que las características físicas de estos suelos no han variado con la aforestación, el hecho de que la MOS en el suelo del bosque sea mayor significa que están ocurriendo cambios en la fracción orgánica del mismo, que paulatinamente pudieran traducirse en modificaciones de las propiedades del suelo. Además, la acumulación de MOS puede estar asociada con la disminución de pH (Evans y Kamprath, 1970; Campos, 1999; Fernández,

**2004**) debido a que los ácidos orgánicos que se generan disminuyen el pH de la solución del suelo, lo cual guarda concordancia con la acidificación encontrada en el bosque.

Por otra parte, el tamaño poblacional de bacterias, hongos y actinomicetos está relacionado con la cantidad de MOS del sistema y se ha afirmado que son más abundantes y eficientes en sistemas con alto contenido de MOS (**Brady 1996; Campos, 1999; Casanova, 2005**). Sin embargo, el efecto de la MOS sobre las poblaciones microbianas no es unidireccional. Su descomposición y consecuente formación de sustancias húmicas (ácidos fulvicos, húmicos y huminas) acidifican la solución del suelo pudiendo afectar sus tasas metabólicas.

Otro aspecto a destacar, es que la sabana estudiada tiene un mayor contenido de MOS comparado con los valores reportados para estudios similares (sistema natural vs. sistema forestal) los cuales oscilan entre 0,63 y 1,6%. A juzgar por este parámetro, ésta sabana parece tener mayor aporte de residuos al suelo ó mayor tasa de descomposición que las sabanas típicas de *Trachypogon sp.* lo cual concuerda con la alta densidad arbórea observada en la sabana estudiada.

## **2.4 Carbono del suelo**

El carbono del suelo guarda estrecha relación con la materia orgánica ya que se considera que aproximadamente el 58% de la masa total es carbono orgánico (CO) (**Fernández, 2004**). Este CO en realidad está formado por una gran variedad de sustancias orgánicas que a juzgar por su estructura química, tiempo de residencia y renovación en el suelo y su labilidad ante la oxidación química o microbiana, son bastante heterogéneas, conformando diferentes compartimientos de C en el suelo. Así bien, las formas de C que contribuyen al C total del suelo que se han considerado en este trabajo son cuatro de las principales: carbono de la fracción ligera (CFL), carbono de la fracción pesada (CFP), carbono soluble (Csol) y carbono microbiano (Cmic).

#### 2.4.1 Carbono orgánico total (CT)

El bosque de *A. mangium* presentó mayor contenido de CT que el suelo de la sabana (K-W;  $p < 0,05$ ). Al igual que el patrón encontrado para la MOS, las diferencias observadas con el aumento de la profundidad no fueron significativas en ninguno de los casos. Independientemente de las unidades en que se exprese (Tabla 9), el aumento de C luego de 10 años es cercano al 50%. Si consideramos la cantidad total de carbono acumulada en el perfil del suelo (105 cm), la variación registrada para los 10 años desde la aforestación es de 43,01% lo cual corresponde a la incorporación de 10889,63  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ . Si se promedia esta cantidad por el tiempo transcurrido luego de la aforestación, se obtiene que alrededor de 108,90  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$  se incorporaron cada año. Aunque es incorrecto asumir que la tasa de secuestro de carbono se mantuvo constante durante el tiempo considerado, este promedio nos permite una visión macro de los cambios ocurridos. **Paul y col.** (2002) realizaron un cálculo similar para comparar los cambios en el C del suelo, luego de ser aforestados, entre trabajos con tiempos y profundidades variables, lo cual les permitió concluir que durante los primeros 5 años el C en el suelo disminuye luego de la aforestación para luego aumentar hasta alcanzar los valores previos al cambio en la vegetación. Estos autores también concluyen que la pérdida inicial de C es menor cuando se utilizan especies deciduas fijadoras de nitrógeno en la aforestación, de manera que el valor promedio calculado en este trabajo es aceptable para las comparaciones.

Si la tasa calculada la expresamos como la media ponderada de la tasa de secuestro de cada horizonte y se expresa en toneladas, obtenemos el valor que la tasa es 0,36  $\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , bastante superior a la encontrada por **Grace y col.** (2006) para las sabanas tropicales (0,14  $\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) con base en una productividad primaria neta promedio de 7,2  $\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . Por otra parte, la tasa de acumulación de C observada es similar a la promedio reportada para bosques tropicales, templados y boreales (Tabla 10).

**Tabla 9.** Cambios en el carbono total (CT) del suelo del bosque de *A. mangium* (B) respecto al suelo de la sabana (S). Las diferencias y el porcentaje (%) de variación se calcularon considerando los valores encontrados en la sabana como los iniciales ( $t_0$ ) respecto a los encontrados en el bosque ( $t_1=10$  años).

		Horizontes			
		E1	E2	E3	Promedio
%	CT	2,59	2,13	1,92	2,21
	Diferencia(B-S)	0,90	0,77	0,52	0,73
	%Variación	53,41	56,10	36,86	49,03
gC·m <sup>-2</sup> *	CT	7157,35	7321,78	21731,28	36210,40**
	Diferencia(B-S)	3095,68	3036,86	4757,09	10889,63
	%Variación	76,22	70,87	28,03	43,01
tonC·kgsuelo <sup>-1</sup> ·ha <sup>-1</sup>	CT	0,26	0,21	0,19	0,22
	Diferencia(B-S)	0,09	0,08	0,05	0,07
	%Variación	53,42	56,43	36,81	49,11

gC: gramos de carbono orgánico en un área de 1m<sup>2</sup>. ton: toneladas=1000Kg.

\*valores corregidos con la Da de cada estrato. \*\* corresponde a la sumatoria de los valores de cada estrato y no al promedio, lo cual cubre la profundidad total evaluada.

**Tabla 10.** Carbono fijado por la vegetación de la tierra como productividad primaria neta (PPN), pool de carbono (C) incluyendo el contenido en la vegetación y en el suelo, y tasa promedio de acumulación de C en el suelo para los principales biomas del mundo. (Extraído y modificado de **Grace y col, 2006**).

Bioma	PPN (MgC·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )	Área (millón Km <sup>2</sup> )	Pool de C Gt C(10 <sup>9</sup> g)	Tasa promedio de acumulación de C (MgC·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )*
Bosque tropical	12,5	17,5	553	0,37
Bosque templado	7,7	10,4	292	0,34
Bosque boreal	1,9	13,7	395	0,34
Tundra ártica	0,9	5,6	117	0,25
Cultivos	3,1	13,5	15	0,01
Sabanas tropicales y praderas	7,2	27,6	326	0,14
Sabanas templadas	3,8	15	182	0,14
Desiertos	1,2	27,7	169	0,07
<b>TOTAL</b>		<b>131</b>	<b>2049</b>	

\*1Mg≈1tonelada=1000kg

#### 2.4.2 Carbono de la fracción ligera (CFL) y pesada (CFP) del suelo

El carbono que forma parte de la fracción ligera del suelo proviene principalmente de la fragmentación de la biomasa vegetal muerta u hojarasca, primeras fases de descomposición. Si el proceso de descomposición ocurre



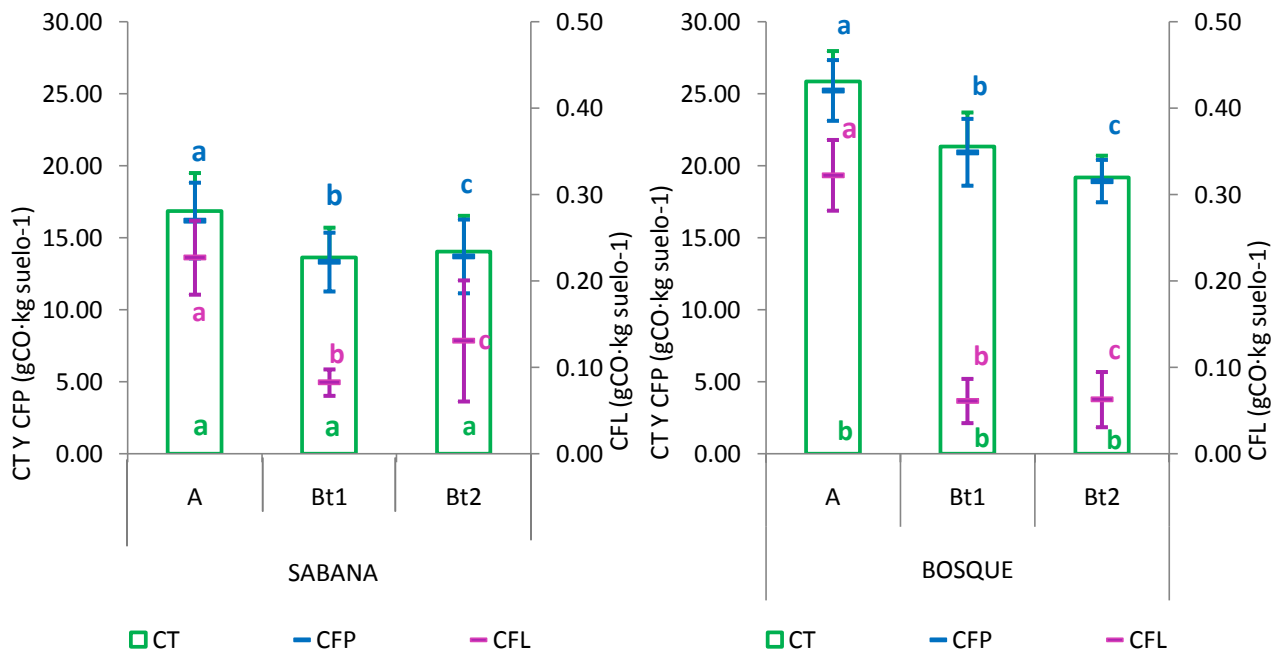
velozmente, uno esperaría que la hojarasca fuera degradada rápidamente de manera que las cantidades de CFL serían también transformadas rápidamente.

El carbono asociado a la fracción ligera del suelo de la sabana no fue diferente al del suelo bajo el bosque de acacia (K-W,  $p > 0,05$ ). Se encontraron variaciones significativas con la profundidad en el bosque, siendo mayor en el horizonte A. A pesar que los aportes de material vegetal al suelo son mucho mayores en el bosque de acacia, todo este material no se encuentra en contacto directo con el suelo lo cual constituye un impedimento físico para la acción de la microbiota edáfica y podría justificar la similitud del compartimiento de CFL.

Por otra parte, los valores observados son menores que el promedio reportado para el pinar de Uverito ( $0,85 \text{ gCFL} \cdot \text{kgsuelo}^{-1}$ ) por **Campos** (1999). Siendo *A. mangium* una especie leguminosa, se esperaba que la calidad de su material vegetal fuese mayor respecto a *Pinus caribaea* ó *Eucalyptus sp.*, especies forestales frecuentemente utilizadas en la restauración y aforestación en Venezuela, y que ello se tradujera en una mayor acumulación de fracción ligera en el suelo. No obstante, hay que tener en cuenta el tiempo transcurrido desde la transformación de la sabana, que en el caso de Uverito (30 años) es mucho mayor que el del presente estudio. Aún con una variación promedio baja de 1,4% en el CFL del bosque de acacia respecto a la sabana, las diferencias pudieron ser detectadas y, suponiendo un incremento en la misma proporción por dos décadas más, el aumento del CFL estará cercano al 5%.

El CFP resultó mayor en el bosque, alcanzando valores de  $21,71 \text{ gC} \cdot \text{kgsuelo}^{-1}$ , lo que representa poco más del doble de lo encontrado en la sabana. Estas diferencias entre sabana y bosque se apreciaron solo en los horizontes A y Bt1. En la Fig.15 se observa la variación de las diferentes formas de C tratadas hasta ahora (CT, CFL y CFP). Los resultados de CFP, tanto para la sabana como para el bosque, son superiores a los encontrados para la sabana testigo en Uverito (Edo. Monagas), lo cual sugiere que el material vegetal de *A. mangium* es de mejor calidad que los residuos de pinos en Uverito. Recordemos que el CFP del suelo es aquel con mayor grado de oxidación, de manera que si el CFL está siendo oxidado con rapidez, el compartimiento CFP aumentará. En

este estudio todas las formas húmicas de la MOS se asumen como parte del compartimiento de la FP y bajo este supuesto se puede decir que el cambio en la vegetación sobre el suelo de la sabana ha favorecido la acumulación de compuestos más recalcitrantes, lo cual se evidencia en el aumento de compartimiento del carbono de la fracción pesada.



**Figura 15.** Carbono total (CT), carbono de la fracción pesada (CFP) y carbono de la fracción ligera (CFL) del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de *A. mangium*. Letras diferentes indican diferencias significativas (K-W;  $p < 0,05$ ) entre sistemas y entre horizontes. Las barras verticales indican el error estándar de la media.  $n_s=18$ ,  $n_B=18$ .

### 2.4.3 Carbono Soluble

El carbono soluble junto con el carbono microbiano es considerado el más lábil de las formas de carbono en el suelo. Representa alrededor del 1% del CT del suelo y se considera la primera fuente de energía utilizada por los microorganismos dado su gran disponibilidad. Sin embargo, dado su solubilidad en agua, es fácilmente lavable alcanzando la capa freática y pasando a formar parte del C disuelto en los océanos (Fernández, 2004), de

manera que con frecuencia y dependiendo de la textura del suelo y condiciones climáticas, las cantidades de Csol suelen estar subestimadas.

La cantidad de carbono soluble entre la sabana y el bosque no se diferenciaron significativamente; sin embargo, si se encontró una estratificación con la profundidad en ambos sistemas siendo mayor hacia la superficie del suelo (Fig. 16). En el bosque, además, se observó un ligero aumento del Csol en Bt2, acompañado del aumento del Cmic en el mismo estrato.

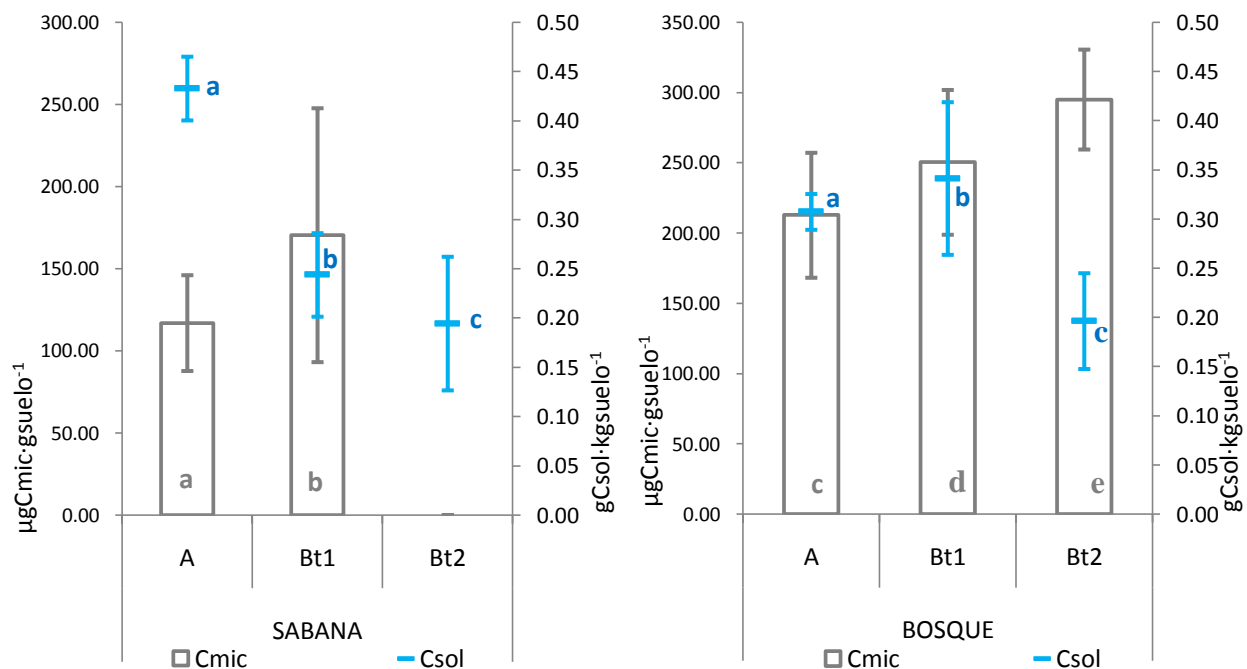
Estos resultados mantienen el mismo patrón con la profundidad observado para CFL y CFP, ya que el Csol está formado por sustancias orgánicas (proteínas, aminoácidos, enzimas) que se incorporan a la solución del suelo por la lisis celular, por la producción de raíces y otros organismos del suelo o por lavado de sustancias orgánicas provenientes de los tejidos en descomposición. Por otra parte, el hecho que el CFP sea mayor en el bosque mientras que la cantidad de Csol no varió entre sistemas, podría sugerir que este material húmico acumulado en el bosque se sigue descomponiendo a la misma tasa inicial, es decir, a la velocidad que ocurría antes de la aforestación.

#### 2.4.4 Carbono microbiano

El carbono microbiano (Cmic) del suelo es aquel asociado a la biomasa microbiana del mismo. Ésta biomasa microbiana forma parte del carbono orgánico total del suelo, constituye un reservorio de nutrientes y está asociada con microorganismos muy diferentes (bacterias, hongos, levaduras, algas, protozoos, entre otros). Las bacterias constituyen los microorganismos de mayor relevancia debido a su papel sobre la descomposición de la materia orgánica, la oxidación del nitrógeno y el azufre orgánico y la fijación simbiótica y no simbiótica del nitrógeno en las plantas (Izquierdo y col., 2003; Casanova 2005).

El suelo bajo vegetación de *A. mangium* presentó una mayor cantidad de Cmic (K-W;  $p < 0,05$ ). Esto sugiere que la biomasa microbiana se ha incrementado como resultado de la transformación de la sabana y muy especialmente por el mayor contenido de C y eventualmente por una mejor condición microclimática. Por otra parte, la disminución del carbono microbiano con la profundidad fue significativa, tanto en el bosque como en la sabana (Fig. 16).

Las cantidades de Cmic encontradas en ambos sistemas son bajas al ser comparadas con las reportadas para suelos bajo vegetación arbórea por **Jekinson y Powlson** (1976) de  $1060 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , y por **Smith y col.** (1995) de  $305 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  en suelos bajo vegetación forestal. Por otra parte, son cercanos a los valores obtenidos por **López-Hernández y col.** (2008) para una sabana venezolana protegida del fuego y pastoreo ( $153 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) y una sabana no protegida ( $113 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ).



**Figura 16.** Carbono soluble (Csol) y carbono microbiano (Cmic) del suelo bajo vegetación de sabana y el suelo bajo vegetación boscosa de *A. mangium*. Letras diferentes indican diferencias significativas (K-W;  $p < 0,05$ ) entre sistemas y entre horizontes. En Bt2 de la sabana, el valor de Cmic observado fue  $0,00 \text{ gCO}\cdot\text{kg}\text{suelo}^{-1}$ . Las barras verticales indican el error estándar de la media.  $n_s=18$ ,  $n_B=18$ .

Es importante señalar que en Bt2 de la sabana las muestras no fumigadas respecto a las fumigadas contuvieron en promedio la misma cantidad de Cmic, de manera que el resultado final es cero. Se debe tener cuidado con la interpretación de este valor dado que es posible no haber detectado diferencias por limitaciones en la sensibilidad del método y no porque el componente microbiano esté ausente a esta profundidad. Sin embargo, dado el patrón observado, es aceptable que en Bt2 del bosque haya mayor Cmic que en el Bt2 de la sabana.

Con respecto a los supuestos asumidos en la determinación de Cmic, hay que destacar que se asume que cada una de las determinaciones son réplicas exactas, lo cual en la práctica no se cumple. Esto es así porque no es posible garantizar que una alícuota de suelo contenga la misma cantidad de microorganismos, de manera que con frecuencia las muestras no fumigadas dan valores de Cmic mayores que las muestras fumigadas, lo cual constituye un problema en la determinación de éste componente. En este trabajo se emplearon triplicados por muestras para tratar de compensar esta limitación.

## 2.5 Relación C/N del suelo

La relación C/N de los suelos puede indicar si existen limitaciones en las velocidades de descomposición de la materia orgánica. Si la cantidad de C presente en el suelo es superior a la cantidad de N necesaria para la mineralización biológica del mismo, se genera competencia por nitrógeno entre los microorganismos lo cual limitaría la velocidad de humificación. En este estudio se encontró que no existe diferencias (Anova;  $p > 0,05$ ) entre horizontes ni entre zonas (Tabla 11). Por otra parte, cuando la relación C/N es superior a 30, se dice que el carbono y el nitrógeno están siendo inmovilizados, es decir, se hacen no disponibles para las plantas y limitan la actividad microbiana (Fig. 17) (UBA, 2001). Dado que esta relación no se ha modificado por la aforestación con acacia, la intensidad de la inmovilización tampoco ha variado. Por otra parte, todo ello depende de la relación C/N de los residuos vegetales ya que ello marcará la demanda de por los microorganismos del suelo por el nitrógeno disponible. Cuando los residuos vegetales presentan una proporción de C mucho mayor a la de N, de alrededor de 25:1, el nitrógeno disponible del suelo es consumido rápidamente por los microorganismos, de manera tal que

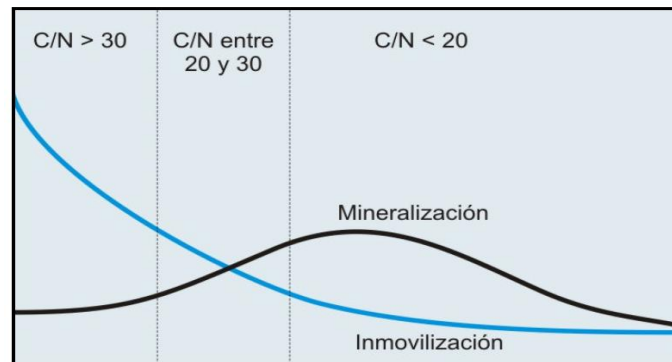
la deficiencia de N del residuo se compense y sea posible su mineralización (UBA, 2001). Dado que *A. mangium* es una leguminosa, ha proporcionado mayor cantidad de N en el suelo, solventando la potencial disminución de N inducida por residuos orgánicos más ricos en C.

**Tabla 11.** Relación carbono-nitrógeno (C/N) del suelo bajo vegetación de sabana y bajo vegetación de bosque de *Acacia mangium*. El valor reportado se calculó a partir del porcentaje de carbono total y el porcentaje de nitrógeno total.  $n_s=18$ ,  $n_B=18$ .

		C/N suelo
SABANA	A	96,95 (a)
	Bt1	128,41(a)
	Bt2	119,79(a)
	<b>Media</b>	<b>115,05</b>
BOSQUE	A	129,34(a)
	Bt1	118,41(a)
	Bt2	101,14(a)
	<b>Media</b>	<b>116,30</b>

Letras diferentes indican diferencias significativas (Anova;  $p>0,05$ ).

Cabe destacar que en materia de secuestro de carbono, es una cualidad deseable que los residuos vegetales tengan mayor proporción de C, además que la disminución de la velocidad de mineralización potencia la retención de este carbono en forma orgánica. Sin embargo, no se puede olvidar que también es deseable que la aforestación, como técnica ecológica de mitigación, permita la conservación de la funcionalidad y biodiversidad del sistema en la medida de lo posible, y ello no es viable al ser afectadas las poblaciones microbianas. Además, en el ciclaje de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica es indispensable.



**Figura 17.** Efecto de los valores de relación C/N del material orgánico sobre los procesos de mineralización o inmovilización (UBA, 2001).

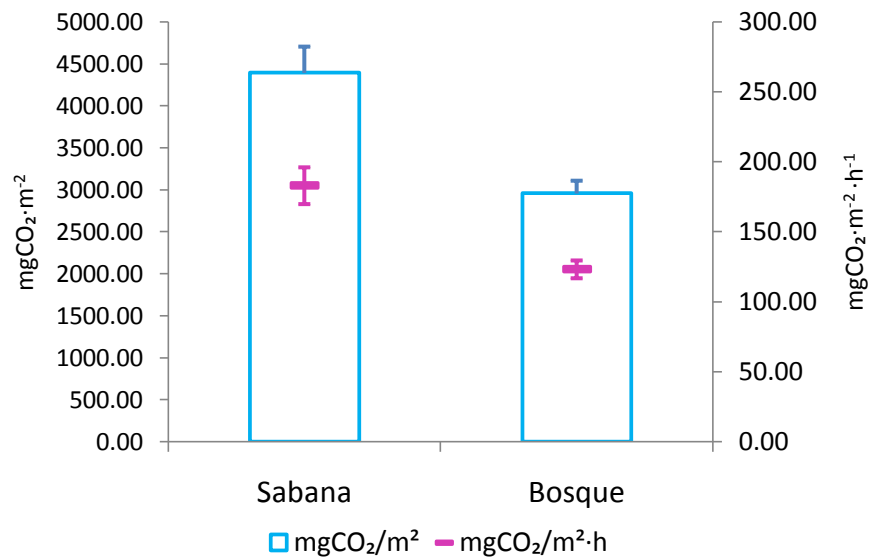
## 2.6 Respiración Edáfica

La respiración edáfica (RE) es una medida de campo que permite comparar de manera directa la emisión de CO<sub>2</sub> por el suelo hacia la atmósfera, e indirectamente la actividad metabólica del suelo. Dado que esta determinación se hace bajo condiciones de campo, los resultados reflejan la sinergia de los factores edáficos (físicos, químicos y biológicos) y climáticos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que aunque las determinaciones se hagan en campo, las condiciones microclimáticas pueden modificarse producto del aislamiento con la cámara de la porción de suelo evaluada, la cual limita la cantidad de luz y oxígeno disponible. Aún así, estas determinaciones suelen ser más representativas del flujo de CO<sub>2</sub> en el sistema.

La RE fue mayor en la sabana que en el bosque (Fig. 18). En general, éste resultado sugiere que hay un mayor flujo de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en la sabana, que puede ser producto de uno o más factores, como son una mayor actividad microbiana y descomposición de la materia orgánica incorporada al suelo y/o una mayor degradación de asimilados por las plantas en la respiración de las raíces. Este CO<sub>2</sub> puede provenir también de la actividad de macro-invertebrados del suelo, de la oxidación química de la MOS ó de la mineralización de la roca. Además, los procesos metabólicos que ocurren a nivel de la raíz y a escala microbiana pueden favorecerse por las altas temperaturas en la sabana y un pH menos ácido. En el bosque, tanto el dosel de acacia como el colchón de hojarasca amortiguan la cantidad de radiación que llega al suelo, de manera que se mantiene una mayor humedad, lo cual también favorece la actividad microbiana.

Sin embargo, no siempre que se registra un mayor flujo, significa una mayor generación de CO<sub>2</sub> o el aumento de las tasas de mineralización por procesos metabólicos y químicos, esto también puede ocurrir por el desplazamiento de los gases desde el espacio poroso del suelo producto del movimiento del agua. Este proceso es más frecuente en épocas de lluvia y es una de las razones de la variación de las tasas de RE encontrada en un mismo sistema, entre la época de sequía y la época de lluvia (**Hernández-Valencia, 1985**).

Los valores de RE obtenidos son superiores a los reportados por **Campos** (1999) para el pinar y la sabana en Uverito, en los cuales no se superó los  $140\text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . **Medina y Zelwer** (1972) también reportan valores de RE para sistemas naturales venezolanos, tales como:  $373\text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  en bosques decídúos,  $372,5\text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  (promedio) para bosques lluviosos,  $136\text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  (promedio) en bosques siempreverdes,  $108\text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  (promedio) en bosques semiáridos y de  $394,5\text{mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  (promedio) para sabanas de *Trachypogon sp.* Tanto en la sabana como en el bosque, las tasas de RE son superiores a las reportadas por estos autores para bosques siempreverdes y semiáridos, sin embargo, el promedio para las sabanas de *Trachypogon sp.* es superior al de la sabana evaluada en este trabajo. Esto último permite confirmar que la diferencia de alrededor de 33% en el flujo de  $\text{CO}_2$  entre la sabana y el bosque, puede ser atribuido a la presencia de *A. mangium*.



**Figura 18.** Respiración edáfica (RE) del suelo bajo vegetación de la sabana y del suelo bajo vegetación del bosque de *A. mangium*. Todas las diferencias son significativas (M-W;  $p < 0,05$ ). Las barras verticales indican el error estándar de la media.  $n=8$ .

## 2.7 Respiración basal

La respiración basal (RB) está referida a la actividad microbiana y por tanto es un indicador del metabolismo del suelo. Evaluar la RB permite además determinar cuál es la contribución de la microbiota al flujo de  $\text{CO}_2$ . En la Fig.

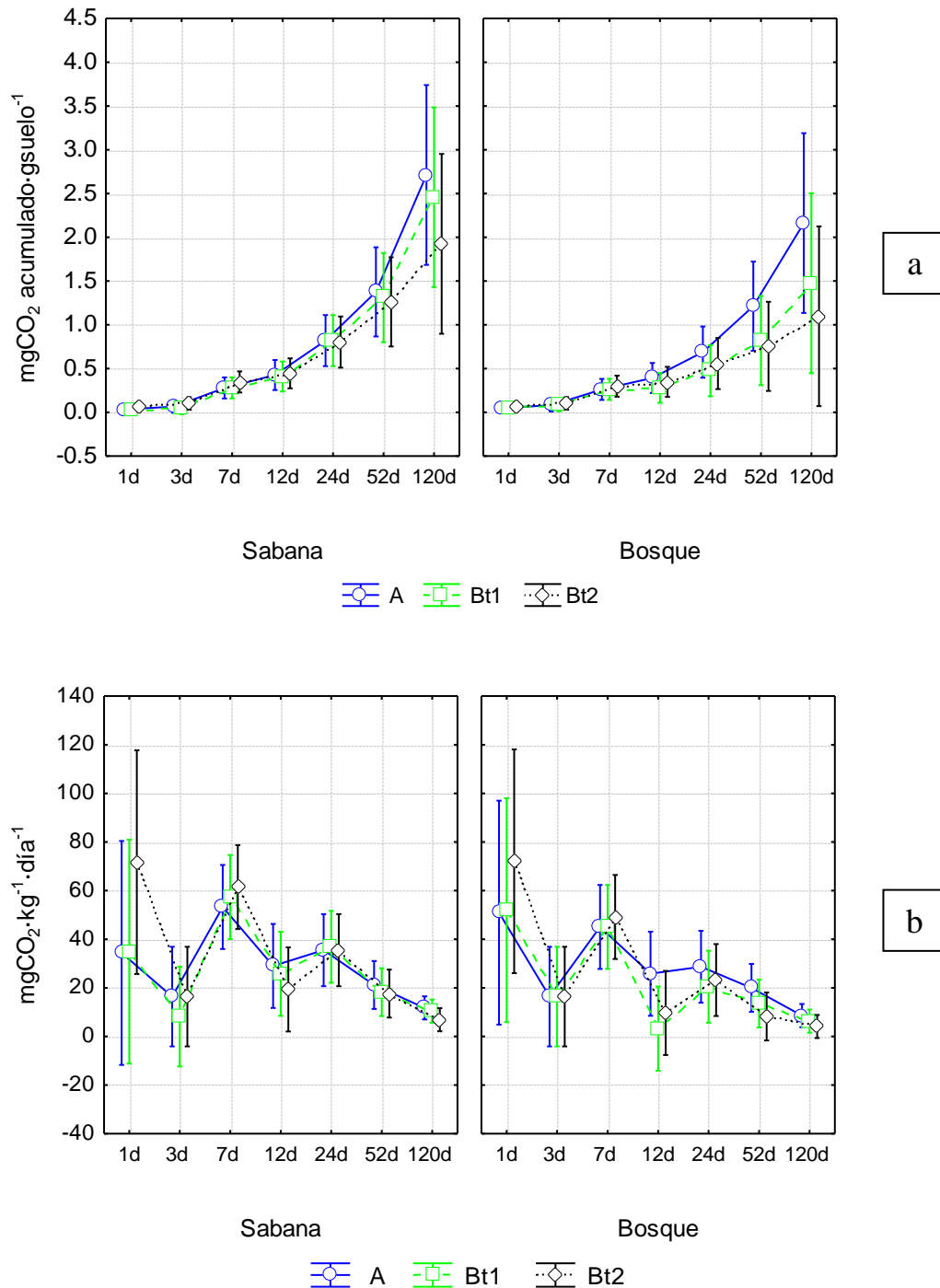


19.a se muestran los miligramos de CO<sub>2</sub> acumulados durante 120 días de incubación para cada uno de los horizontes de cada zona, y en la Fig. 19.b las tasas de producción de CO<sub>2</sub> correspondientes.

Las diferencias entre la sabana y el bosque de acacia no fueron significativas, así tampoco respecto a la profundidad. Esto se cumple tanto para las cantidades acumuladas de CO<sub>2</sub> como para las tasas. El orden de magnitud del promedio obtenido, considerando los 120 días de incubación, fue para la sabana de 29,62 mgCO<sub>2</sub> kg·día<sup>-1</sup> y para bosque de 25,48 mgCO<sub>2</sub> kg·día<sup>-1</sup>, los cuales son semejante al de la sabana y el pinar evaluado por **Campos** (1999).

Por otra parte, en todos los casos se encontraron diferencias en la tasa de emisión de CO<sub>2</sub> respecto al tiempo de incubación y bajo un mismo tipo de vegetación. Estos resultados son cónsonos con la degradación de las sustancias más lábiles al inicio del ensayo y menor emisión con la mineralización de las sustancias más recalcitrantes al final. De acuerdo con la Figura 19.a, la RE no alcanzó un *plateau* a los 120 días, más bien la tendencia parece indicar un posible aumento posterior. La rapidez con la cual se alcanza esta condición de “no-variación” en la emisión de CO<sub>2</sub> depende de la cantidad de MOS inicial y de su calidad. Sin embargo, para las tasas de emisión (Fig. 19.b.) la tendencia fue a la estabilización, convergiendo todos los horizontes hacia un mismo valor.

Respecto al tiempo de respuesta del suelo, y con ello me refiero al transcurrido hasta detectar CO<sub>2</sub> en todas las muestras de un mismo estrato, éste estuvo entre tres y siete días lo cual justifica la gran desviación de las tasas de emisión de CO<sub>2</sub> durante ese periodo. Además sugiere dos cosas: que el tiempo de refrigeración de las muestras previo al ensayo limitó la respuesta ó, la concentración del álcali no permitió detectar pequeñas cantidades de CO<sub>2</sub> generadas durante los primeros días. Sin embargo, dado que durante los primeros días se espera que las fracciones más lábiles del carbono sean rápidamente consumidas, se espera también que el flujo de CO<sub>2</sub> sea mayor al inicio del ensayo, por lo cual no se explica la tendencia observada.



**Figura 19.** Respiración basal (RE) del suelo bajo vegetación de la sabana y del suelo bajo vegetación del bosque de *A. mangium* A) miligramos de CO<sub>2</sub> acumulados durante los 120 días de medición. B) tasa de producción de CO<sub>2</sub> durante los 120 días de medición. Los resultados no fueron significativos entre tipos de vegetación ni profundidad (Anova;  $p < 0,05$ ). Las barras verticales indican intervalos de 95% de confianza. Gráfico obtenido y modificado del programa Statistica 7.  $n_S=18$ ,  $n_B=18$ .

Dado que no se encontraron diferencias entre los tipos de vegetación, se puede concluir que la respiración microbiana del suelo no ha sufrido modificaciones por la aforestación con *A. mangium*. En consecuencia, las tasas de descomposición de la MOS son iguales y no se ven afectadas por el aumento en acidez del bosque ni por las diferencias en la calidad y cantidad de los residuos vegetales.

Por otra parte, la RE indicó que la sabana tiene mayor flujo de CO<sub>2</sub>, pero dado los resultados de la RB, la diferencia entre flujos netos de CO<sub>2</sub> entre la sabana y el bosque no puede ser explicada a partir de los cambios en las tasas de descomposición microbiana. En este caso, la hipótesis de que la contribución al flujo por la degradación de asimilados en las raíces de las plantas o bien por actividad de la edafofauna, resulta más relevante.

## **2.8 Coeficientes metabólicos**

Dado que los cálculos de coeficientes metabólicos requieren valores de Cmic y RB equivalente en el tiempo de determinación, se consideró el promedio de RB entre los 7 primeros días de incubación, condición que es más o menos equivalente al período de 5 días de fumigación establecido para la determinación de Cmic. En la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos para los tres coeficientes considerados. En general, las únicas diferencias encontradas entre sistemas ocurrieron entre los horizontes Bt2, donde la cantidad de carbono incorporado a la biomasa microbiana como la eficiencia de mineralización de carbono por parte de los microorganismos es superior en el bosque (KW; p<0,05). Sin embargo, este resultado no es concluyente dado las limitaciones en la determinación de Cmic que se tuvieron en el tercer horizonte de la sabana, como ya se comentó.

Por su parte, el coeficiente metabólico  $qCO_2$  indicó que la eficiencia de los microorganismos en la mineralización de la MOS se mantiene igual entre la sabana y el bosque. Por su parte, en el estrato superficial de la sabana la mineralización de carbono por unidad de biomasa microbiana es mayor que en los horizontes subsuperficiales (Tabla 12), con un valor de 1,20 mgCO<sub>2</sub>·mgCmic<sup>-1</sup>, lo que equivale a una diferencia en eficiencia de

aproximadamente 41% con SBt1. En condiciones de estrés para los microorganismos, los valores de  $qCO_2$  suelen ser mayores ya que el metabolismo de las bacterias suele acelerarse, asimilando muchas más C del medio, lo que se traduce en un mayor flujo de dióxido de carbono (Odum, 1969). Sin embargo, esto no parece ser el caso en la sabana ya que se encontró que el Cmic disminuye con la profundidad y no hay estratificación de la RB, por lo tanto la eficiencia en la adquisición de carbono orgánico disminuye con la profundidad por la disminución de la biomasa microbiana.

**Tabla 12.** Respiración basal (RB) promedio y coeficientes metabólicos de los horizontes bajo vegetación de sabana y bajo vegetación boscosa de *A. mangium*.

	<b>RB*</b> mgCO <sub>2</sub> ·Kg <sup>-1</sup> ·dia <sup>-1</sup>	<b>qCmic</b> (Cmic/CT)	<b>qCT</b> (CO <sub>2</sub> /CT)	<b>qCO<sub>2</sub></b> (CO <sub>2</sub> /Cmic)
Sabana A	92.98 (23,09)	0,009 (0,003)a, A	0,056(0,015)a, A	1,20(0,473) a, A
Sabana Bt1	93.18 (15,66)	0,014(0,006) b, A	0,071(0,013)a, A	0,71(0,188) b, A
Sabana Bt2	114.89 (22,00)	0,000** c, A	0,088(0,019)a, A	0,00** c, A
<b>Media Sabana</b>	<b>100,35</b>	<b>0,007</b>	<b>0,071</b>	<b>0,64</b>
Bosque A	87.63 (20,25)	0,009(0,002) a, A	0,037(0,011)a, A	0,33 (0,079) a, A
Bosque Bt1	87.39 (18,01)	0,012(0,002) a, A	0,043(0,008)a, A	0,46 (0,144) a, A
Bosque Bt2	98.55 (16,92)	0,015(0,001) a, B	0,054(0,011)a, A	0,40 (0,122) a, B
<b>Media Bosque</b>	<b>91,19</b>	<b>0,012</b>	<b>0,045</b>	<b>0,40</b>

Letras diferentes indican diferencia significativa (minúsculas: entre horizontes bajo igual vegetación; mayúsculas entre horizontes bajo tipo de vegetación diferente), (K-W; p>0,05). \* Valor promedio entre el primer y séptimo día de incubación. \*\* este valor es cero dado que el Cmic es cero en este estrato. Los valores entre paréntesis indica el error estándar. n<sub>S</sub>=18, n<sub>B</sub>=18.

Por otro lado, el hecho de que en el bosque el coeficiente metabólico sea semejante entre horizontes a pesar de la disminución del Cmic con la profundidad, indica que la eficiencia de mineralización de carbono aumenta con éste factor, es decir, se generan igual masa de CO<sub>2</sub> a partir de una menor cantidad de biomasa microbiana. Esto indica a su vez un menor requerimiento de carbono por parte de los microorganismos en el bosque y sugiere que el ambiente es menos estresante que en la sabana. Esto último contrasta con el posible efecto negativo de la disminución del pH sobre la actividad metabólica del suelo, aunque debe considerarse que en el bosque es mayor el contenido de N, la humedad del suelo y las condiciones microclimáticas, factores que pudieran ser mas determinantes en las condiciones de estrés para la microbiota del suelo.

## 2.9 Contribución de las diferentes formas de carbono al carbono total (CT) del suelo

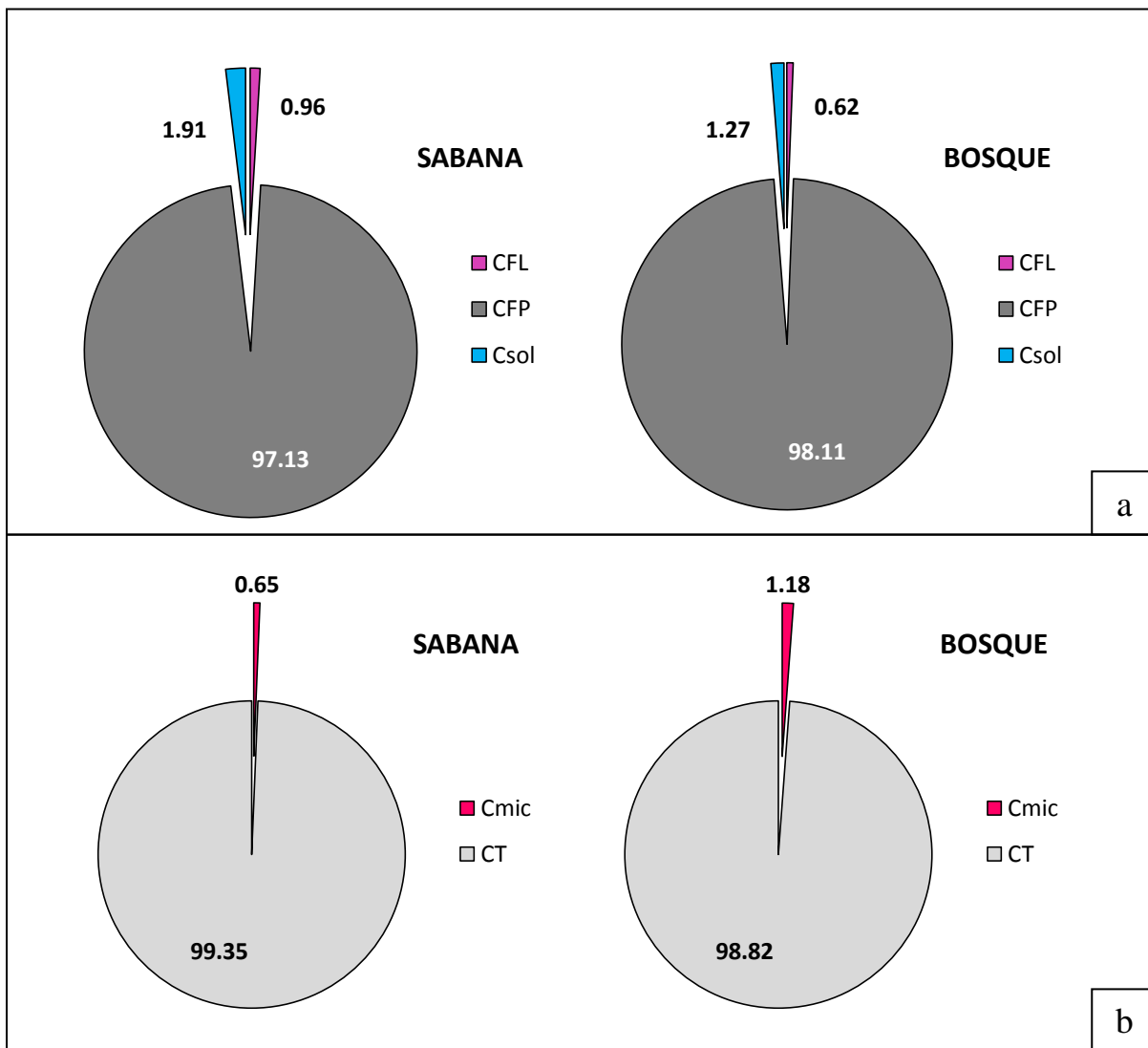
Cuando la materia orgánica es fraccionada físicamente, como fue el caso del fraccionamiento utilizado en este trabajo, hay una conexión tácita entre las subdivisiones consideradas. El carbono de la fracción ligera (CFL), la fracción pesada (CFP) y el carbono soluble (Csol), comprenden los fragmentos mejor separados derivados de éste fraccionamiento. Por otra parte las fronteras entre el carbono microbiano (importante componente dinámico del CT) y las otras formas del carbono, no están metodológicamente bien establecidas, de manera tal que al representar la contribución del CFL, CFP y Csol al CT el componente microbiano se mantiene inmerso, en proporciones desconocidas, dentro de todas estas formas del carbono. Es por ello que, para una mejor comprensión y mínima sobreestimación del cambio en las proporciones de estos elementos entre los sistemas evaluados, se considerará el CFL, CFP y Csol como fracciones del CT y luego se estimará cuanto representa el carbono microbiano (Cmic) del CT.

En general, evaluar la proporción de las diferentes formas de carbono nos permite identificar la forma predominante del carbono orgánico del suelo y comparar la magnitud de los cambios generados por la transformación de la sabana a escala porcentual. Además, dado que las fracciones de la materia orgánica representan también un importante reservorio de nutrientes, el tamaño relativo de estas fracciones puede sugerir el grado de importancia de cada uno en la fertilidad del suelo.

La Fig.20.a muestra el porcentaje en el cual las diferentes formas de carbono contribuyen al CT. Tanto en la sabana como en el bosque, el CFP representa más del 97% del CT. Esto significa entonces que la mayor cantidad de carbono y presuntamente también de nutrientes, se encuentra asociada a la fracción pesada del suelo, compartimiento que representa a su vez el carbono con mayor grado de humificación. Las demás fracciones se diferencian poco entre sistemas.

Al respecto **Campos** (1999) encontró que la cantidad de nitrógeno asociada a la fracción pesada fue alrededor de mil veces mayor que la asociada a la fracción ligera, reconociendo a la primera como una fuente con mayor

abundancia de este macroelemento. Por otra parte, **Phiri y col.** (2001) encontraron correlación positiva entre el fósforo asociado a la fracción ligera y el fósforo extraíble con bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ), atribuyendo a ésta fracción de la MO los cambios en el fósforo disponible del suelo. Sin embargo, en el caso de los cambios en el contenido de fósforo por la aforestación con *Pinus caribaea*, los resultados de **Hernández-Valencia y Bautis** (2005) no corroboran ésta correspondencia entre la FL y P inmediatamente disponible.



**Figura 20.** Proporción de las diferentes formas de carbono estimadas para la sabana y para el bosque de *A. mangium*. Los valores que se muestran representan el porcentaje de contribución al carbono total en cada zona. **a)** Contribución del carbono de la fracción pesada (CFP), carbono de la fracción ligera (CFL) y carbono soluble (Csol) al carbono total del suelo. **b)** Contribución del carbono microbiano (Cmic) al carbono total (CT). Este compartimiento se separa del resto debido a que se expresa tácitamente en las demás formas de carbono representadas en la figura anterior.  $n_S=18$ ,  $n_B=18$ .

El punto más interesante en la comparación de las diferentes formas del carbono entre la sabana y el bosque de acacia, radica en que el CT aumentó como resultado de la aforestación, pero este aumento parece estar asociado solo a pequeñas variaciones del CFP. Al contemplar la proporción que representa el componente microbiano, también observamos un aumento para el bosque (Fig. 20.b). La proporción del Cmic en el bosque es mayor que la encontrada para la sabana sugiriendo esto una redistribución de los reservorios de carbono, favoreciéndose el componente más dinámico y lábil. Esto es de esperarse ya que los cambios a corto plazo resultan más evidentes en las fracciones orgánicas del suelo. La fracción pesada presenta tasas de recambio inferiores a la fracción microbiana, sin embargo fue posible apreciar en un tiempo de 10 años, que en el bosque la humificación de la MOS está siendo favorecida con la acumulación de C en la FP.

El aumento del componente microbiano puede también ser relevante en la disminución del fósforo disponible encontrada para el bosque ya que se ha reportado que incrementos en la materia orgánica del suelo incrementan las superficies reactivas a los iones fosfatos (**Hernández-Valencia y Bautis, 2005**). Aunque el efecto positivo de la MOS sobre el P disponible también es posible, en este caso esta posibilidad se descarta dado que los resultados han indicado que las tasas mineralización no han variado desde la aforestación, lo que además sugiere que el cambio antagónico entre el P y el Cmic puede estar asociado a competencia por el fósforo del suelo por parte de *A. mangium* y los microorganismos.

### **3. Efecto de la aforestación con *Acacia mangium* sobre las propiedades del suelo de la sabana**

Hasta ahora se han discutido por separado los elementos indicadores de cambios en las propiedades del suelo de la sabana de *T. spicatus* como consecuencia del establecimiento de *A. mangium*. En el tema de la aforestación como iniciativa para la mitigación del calentamiento global, el carbono y la materia orgánica total merecen la mayor atención. Sin embargo, no se pueden desligar las relaciones entre los compartimientos del

carbono con la dinámica y el funcionamiento del ecosistema. Es por ello que es importante enfatizar la vinculación entre los resultados positivos para el secuestro de carbono en el bosque de acacia y su significado sobre las otras características del sistema.

Para iniciar en esta tarea es importante tomar en cuenta los parámetros evaluados que se han visto significativamente afectados por la aforestación con *A. mangium*. En esto nos asistirá la Tabla 14, en donde se han dispuesto las diferencias absolutas y relativas encontradas, entre sabana y bosque, en las 33 variables evaluadas en este trabajo. Nótese que el sentido del cambio está señalado para cada uno de los horizontes y el promedio en la columna de diferencias absolutas, esto es así porque las diferencias señaladas se han calculado tomando los valores adoptados de cada variable en el bosque y sustrayéndolos de los valores respectivos de la sabana, permitiéndonos visualizar rápidamente si su cantidad aumentó o disminuyó.

Solo en 16 de las variables evaluadas se detectaron cambios estadísticamente significativos entre zonas, en al menos uno de los niveles de profundidad evaluados (A, Bt1, Bt2). Ellos fueron: carbono total (CT), carbono de la fracción pesada (CFP), carbono microbiano (Cmic), materia orgánica del suelo (MOS), pH, cantidad de fósforo disponible (Pdis), cantidad de nitrógeno total (Nt), concentración de magnesio (Mg), concentración de potasio (K), concentración de sodio (Na), concentración de aluminio (Al), concentración de protones (H), acidez total, humedad, respiración edáfica (RE), coeficiente metabólico ( $qCO_2$ ), carbono de la hojarasca (Choj) y biomasa de hojarasca (hoj).

Adicionalmente, se cuenta con un informe de avance sobre la evaluación ecofisiológica de este bosque **Petropiar** (2006) que permitirá hacer comparaciones temporales con los resultados obtenidos en este trabajo.

Ahora bien, con estas dos herramientas la pregunta a responder es: ¿Cómo pueden interpretarse estos cambios en términos de flujo de  $CO_2$  y fertilidad del suelo?.



**Tabla 13.** Variación absoluta y relativa de los diferentes parámetros estimados como indicadores del cambio en la dinámica y cantidad de carbono en el suelo de la sabana aforestada. Los valores que se reportan son relativos a los obtenidos en la sabana y muestran la variación del parámetro medido en el bosque. Valores en rojo indican diferencia significativa entre sistemas en al menos un nivel de profundidad ( $p < 0,05$ )

Unidades	Variable	Diferencia absoluta respecto a la sabana				Variación relativa (%) respecto a la sabana			
		A	Bt1	Bt2	Promedio	A	Bt1	Bt2	Promedio
gCO <sub>2</sub> ·Kgsuelo <sup>-1</sup>	CT	9,01	7,70	5,17	7,29	53,42	56,43	36,81	49,11
	CFP	9,04	7,62	5,23	7,29	55,78	57,24	38,16	50,393
	CFL	0,095	-0,021	-0,068	0,002	41,97	25,78	51,93	1,40
μgCmic·gsuelo <sup>-1</sup>	Csol	-0,125	0,098	0,002	-0,009	28,97	40,02	1,02	2,97
	Cmic	95,82	79,97	295,09	156,96	81,93	46,92	--*	163,84
	MO	1,55	1,32	0,89	1,25	53,41	56,10	36,86	49,03
μg·gsuelo <sup>-1</sup>	pH	-0,53	-0,65	-0,63	-0,60	11,30	14,63	14,63	13,47
	Pdis	-2,88	-3,25	-1,32	-2,48	51,99	77,53	78,35	65,25
	Nt	0,00	0,01	0,01	0,01	5,97	60,13	75,05	39,27
	Ca	0,05	-0,09	0,00	-0,01	29,63	41,87	0,00	5,98
	Mg	-0,28	0,05	0,05	-0,06	78,79	45,45	55,56	30,19
	K	0,00	0,11	-0,01	0,03	12,50	397,79	25,00	151,62
	Na	0,10	0,03	0,05	0,06	188,89	120,00	266,67	182,35
	Al	0,35	0,02	-0,32	0,02	757,14	14,29	62,34	7,62
	H	-0,09	-0,15	-0,14	-0,13	30,43	37,93	32,81	33,93
	Acidez total	0,26	-0,09	-0,45	-0,10	73,58	17,72	48,23	15,75
Cmol·Kg <sup>-1</sup>	CICE	0,12	-0,01	-0,37	-0,09	12,93	1,65	29,83	8,46
	SB	-23,82	16,87	23,36	5,47	37,79	44,24	100,95	13,20
g·Kg <sup>-1</sup>	FP	0,45	0,23	0,46	0,38	0,46	0,23	0,46	0,38
g·kg <sup>-1</sup>	FL	0,06	-0,02	-0,14	-0,03	30,17	28,22	70,48	22,55
%	Humedad	3,62	-0,85	-1,67	0,37	49,86	11,26	31,47	5,46
mLH <sub>2</sub> O·100gsuelo <sup>-1</sup>	CC	2,78	5,21	0,21	2,73	7,49	15,53	0,54	7,49
g·cm <sup>-3</sup>	DA	-0,12	0,06	0,01	-0,02	8,11	3,77	0,78	0,95
%	Arena	1,81	0,55	3,63	2,00	1,99	0,62	4,46	2,29
%	Limo	-0,66	0,15	-0,35	-0,28	13,82	3,89	6,30	5,98
%	Arcilla	-1,19	-0,70	-3,28	-1,73	26,65	10,76	25,26	21,56
	C/N suelo	32,39	-10,00	-18,65	1,25	33,41	7,79	15,57	1,08
mgCO <sub>2</sub> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>	RE	-	-	-	-59,81	-	-	-	32,67 <sup>Δ</sup>
μgCO <sub>2</sub> ·gsuelo <sup>-1</sup>	RB promedio	-50,87	-104,30	-98,88	-84,68	16,06	35,63	38,13	29,24
μgCO <sub>2</sub> ·μgCmic <sup>-1</sup>	qCO <sub>2</sub>	-0,87	-0,24	0,40	-0,24	72,20	34,50	--*	53,35
gC·m <sup>-2</sup>	Choj	-	-	-	1199,47	-	-	-	763,71 <sup>Δ</sup>
ghoj·m <sup>-2</sup>	Hoj	-	-	-	1640,59	-	-	-	763,95 <sup>Δ</sup>

Las variables con el superíndice "Δ" se evaluaron con n=10 en cada sistema. En las demás variables el n muestral por sistema fue 18. La diferencia en cada horizonte y promedio se calculó como: [valor de la sabana(t<sub>0</sub>) - valor del bosque(t<sub>1</sub>)]. El % de variación promedio se calculó a partir de la diferencia promedio. \*dado que en la sabana el valor de Cmic en el Bt2 fue cero, el porcentaje de variación no pudo calcularse.

## Cambios en la cantidad y dinámica del carbono suelo

El tiempo transcurrido desde la aforestación ha sido suficiente para generar cambios en el compartimiento del carbono del suelo, siendo evidente el aumento de la biomasa de hojarasca, la materia orgánica, el carbono total y el carbono microbiano. Lo más resaltante de este aspecto es que los cambios han sido detectados hasta 1m de profundidad, indicando eficiencia en el propósito inicial de la transformación: crear un bosque de compensación que almacene o secuestre carbono efectivamente.

Hay que recordar que ésta es la profundidad mínima a la cual se considera deben verificarse los cambios observados en la superficie para concluir que son positivos en materia de secuestro de carbono (**Fernández, 2004**). La rapidez de esta respuesta puede ser atribuida al uso de *A. mangium* como especie forestal, en vez de otras de uso común en Venezuela (como eucaliptos y pinos), cuya respuesta favorable ha sido detectada solo en los primeros centímetros de suelo y luego de 30 años de establecida (**Campos, 1999; Garay y col. 2004, Hernández-Valencia y Bautis, 2005; Bouillet y col. 2008**).

La cantidad de hojarasca en el bosque de acacia fue de  $18,55\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  en contraste a las  $2,15\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  encontradas en la sabana. **Petropiar** (2006) reportó una tasa de descomposición de la hojarasca de *A. mangium* de solo 0,12% de pérdida diaria de peso seco. Aún así, bajo el supuesto que la tasa se mantenga en el tiempo, se esperaría que en 10 años más, en el bosque hayan desaparecido por descomposición  $0,22\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  de hojarasca. Además, si el 58% de la materia orgánica está constituida por carbono (**Fernández, 2004**), ello significaría que  $0,13\text{tonC}\cdot\text{ha}^{-1}$  serían mineralizados, esperándose que una buena cantidad sea sumada al suelo bajo vegetación de *A. mangium*, bajo la consideración de que el flujo de  $\text{CO}_2$  en el bosque se mantenga menor que en la sabana. Además, la hojarasca del bosque de *A. mangium* es de mejor calidad que la hojarasca de la sabana dada su condición de leguminosa, de manera que la limitación de la degradación de los residuos orgánicos por competencia de los microorganismos por el nitrógeno del suelo no es posible dado que este macroelemento ha

aumentado con la aforestación. Todo esto sugiere un importante incremento en el potencial de secuestro de carbono junto al mejoramiento de la calidad orgánica del suelo.

La variación del CT encontrada entre zonas fue de 43,01% lo que representa un aumento anual de 1088,96 gC·m<sup>-2</sup>. Sin embargo, hay que destacar que de todas las formas de carbono evaluadas, el microbiano presentó la variación más importante, con un aumento del 163,84%. Esto indica que una parte importante del carbono secuestrado en el suelo, está siendo retenido por los microorganismos, sin que ello suponga un aumento en la respiración. Claro que, dado la labilidad del compartimiento microbiano, aún no es posible afirmar que el C esté siendo estabilizado en el suelo. En esta estabilización, parece estar jugando un papel importante el CFP, que también aumentó en un 50,39%. Por otra parte, no haber registrados cambios en el carbono de la fracción ligera puede ser atribuido a la alta variabilidad de las muestras, lo cual enmascaró las posibles diferencias. Esta alta variabilidad es propia del sistema y podría compensarse tomando mayor cantidad de muestras por estrato, al menos para el fraccionamiento y las determinaciones posteriores de carbono.

Se encontraron diferencias en la RE respecto a las reportadas en el 2006 por **Petropiar**. Para ese entonces la RE de la sabana no se diferenciaba significativamente de la RE del bosque (227,8 y 206,7 mgCO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, respectivamente) en mediciones hechas durante mayo-noviembre. A pesar de que las medidas de respiración edáfica y basal hechas en este trabajo son puntuales, la aproximación es que tres años después el metabolismo de los suelos se diferencian en un 32,67%, medidas hechas también en época de lluvia (agosto). En cuanto a los factores que pueden estar modulando esta diferencia en el flujo de CO<sub>2</sub>, la respiración de raíces y la proveniente de la actividad de la edafofauna parece ser más importante en ello. Esto apoyado en el hecho de que la respiración microbiana es similar entre sistemas. Además, las condiciones microclimáticas son más favorables en el bosque, lo que pudiera explicar que a pesar del aumento en la biomasa microbiana, ello no se exprese en el aumento de la tasa metabólica bacteriana, favoreciéndose con ello el secuestro de carbono.

En conclusión, los resultados sugieren que al comparar la dinámica de carbono entre la sabana y el bosque, éste último figura como mejor y más activo sumidero de C que la sabana. Esto también puede ser apoyado en el hecho de que *A. mangium* presentó mayores tasas fotosintéticas a CO<sub>2</sub> saturante, mayor eficiencia de carboxilación y mayor punto de compensación de CO<sub>2</sub> que la sabana y un pinar, de acuerdo con los resultados de **Petropiar (2006)**.

### Cambios en la fertilidad del suelo

En este caso, los cambios en la fertilidad del suelo fueron más evidentes en las variaciones del contenido de nitrógeno (N) y fósforo disponible (Pdis). Sin embargo no hay que dejar de lado otros tres indicadores básicos de la fertilidad de los suelos, como son: pH, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y el porcentaje de saturación de bases (SB), de los cuales solo el pH marco diferencias entre sistemas.

El sodio y el nitrógeno total del suelo aumentaron con la aforestación, pero la cantidad de fósforo disponible disminuyó. En el 2006 los niveles de potasio y fósforo eran similares entre la sabana y el bosque de acacia, mientras que a nivel superficial no se encontraron diferencias entre la cantidad de nitrógeno pero sí para las cantidades de calcio, siendo menores en el bosque (**Petropiar, 2006**). Tres años después se aprecian diferencias más marcadas de estos nutrientes en todo el perfil del suelo, evidenciando el efecto de la aforestación.

La proporción de estos elementos en el suelo suele ser de gran importancia en la productividad vegetal. En el bosque de *A. mangium* parece no justificarse la fertilización con nitrógeno ya que el cambio de vegetación favoreció la disponibilidad de los mismos. Por su parte el fósforo se ha hecho menos disponible presumiblemente como consecuencia de la disminución del pH en el suelo del bosque, aunado al alto requerimiento por parte de los simbioses fijadores de N asociados con acacia. Esto último justificaría el encalado ó la fertilización con fósforo. Hay que destacar que las plantas leguminosas son fuertemente afectadas por la deficiencia de fósforo en

los suelos ya que un bajo suministro inhibe la nodulación y retarda los procesos biológicos de fijación de nitrógeno.

El objetivo del encalado sería neutralizar las cantidades de aluminio intercambiable, principal responsable de la acidez en los suelos. El encalado a su vez proporciona calcio y magnesio, nutrimentos asociados frecuentemente a cultivos tolerantes a la acidez y aumenta la disponibilidad de P. La interacción encalado-fósforo en suelos ácidos suele ser tratada con especial cuidado ya que excederse en las cantidades apropiadas puede modificar negativamente el funcionamiento del sistema y la productividad. Además, la fertilización de suelos arenosos como los del suelo del bosque suele no ser efectiva debido a que éste es fácilmente lavado hasta el nivel freático.

Si bien el secuestro de carbono aumenta con la acumulación de materia orgánica, mientras mayor es su porcentaje, el pH del suelo suele ser menor dada la incorporación de ácidos orgánicos producto de la descomposición de la MO. De manera que si la MOS aumenta como se espera y es humificada, es probable que el pH del suelo se torne más ácido y las limitaciones en el crecimiento vegetal por fósforo y otros elementos sean más severas. Además, en los casos de manejo de la acidez en sabanas venezolanas se suele considerar solo las limitaciones para la planta pero en el caso de *A. mangium* la tolerancia de los simbiontes fijadores de nitrógeno debe ser considerada, ya que de ser afectada esta interacción se reduciría el aporte de nitrógeno.

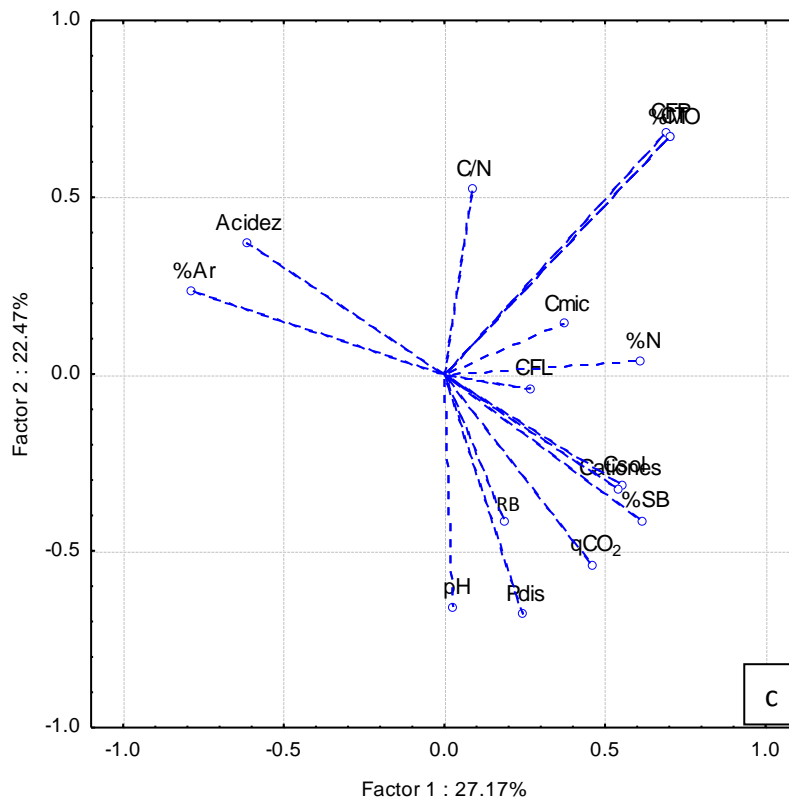
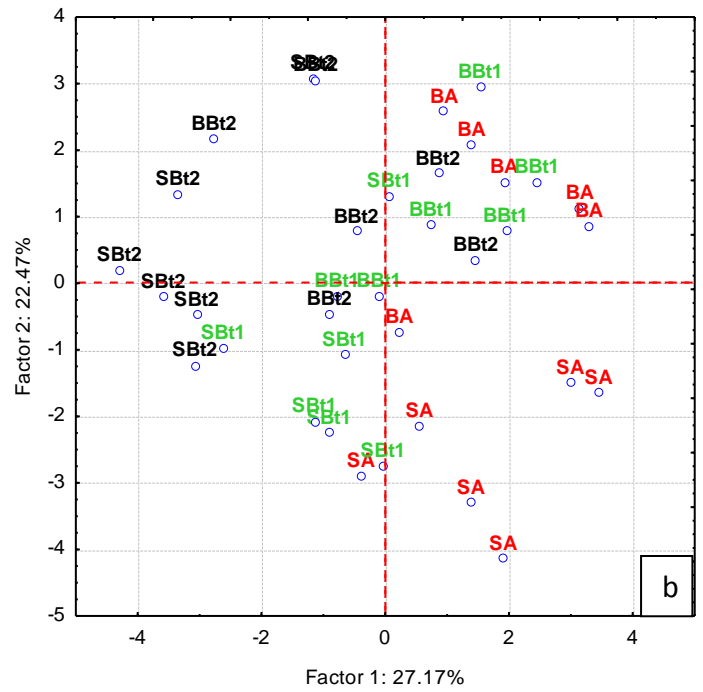
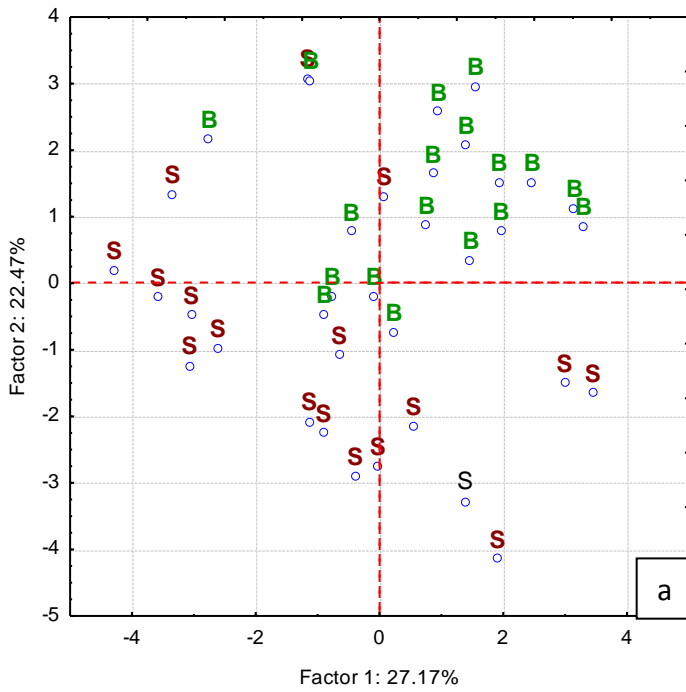
#### **4. Consideraciones sobre la aforestación con *Acacia mangium* y creación de sumideros de carbono.**

El factor más importante en la diferenciación entre el sistema natural y aquel modificado es el tiempo. Tal como se ha expuesto, para el año 2006 (siete años luego de la aforestación) no se habían registrado cambios importantes en la respiración edáfica del bosque; sin embargo, los resultados de este trabajo han permitido diferenciar el metabolismo de estos suelos, identificándose a la sabana como mayor emisor de CO<sub>2</sub>. De igual manera, otros parámetros que permanecieron similares durante los primeros siete años de aforestación, hoy presentan una clara tendencia de cambio. De allí la relevancia de examinar la dirección trazada por los cambios

reconocidos hasta ahora. La Fig. 21 nos muestra, a través de un análisis de ordenamiento por componentes principales, la tendencia de los cambios esperados con base en los resultados obtenidos en este trabajo.

En la proyección de los casos (Fig. 21.a), el bosque y la sabana se logran visualizar como dos grupos diferentes agrupándose las observaciones del bosque principalmente en el primer cuadrante del eje de coordenadas. Al contrastar la proyección de los casos con la dirección de los vectores que representan las variables (Fig.21.c.), se observa que en el bosque el carbono de la fracción pesada (CFP), el carbono total (CT), la materia orgánica (%MO), el carbono microbiano (Cmic), el nitrógeno total (%N) y la relación carbono-nitrógeno del suelo (C/N), presentan una tendencia al aumento, mientras que las variables pH, fósforo disponible (Pdis), respiración basal (RB) y el coeficiente metabólico ( $qCO_2$ ) muestran tendencia a disminuir. Hay que destacar que de estas variables, aquella cuyo vector guarda menor ángulo con el eje vertical (segundo componente principal: factor 2), marcan en mayor grado las diferencias entre la sabana y el bosque. Mientras que cuando esto sucede con el eje horizontal (primer componente principal: factor 1), las variables son más importantes en la diferenciación de horizontes, es decir, marcan la diferencia con la profundidad.

El establecimiento del bosque de *A. mangium* significará el favorecimiento del compartimiento microbiano del carbono, la disminución de las tasas de descomposición, el aumento de la eficiencia metabólica de los microorganismos, la acumulación de biomasa vegetal y el aumento de la reservas de nitrógeno en el suelo. En estos aspectos destacan las diferencias entre bosque y sabana. Entre las similitudes sugeridas por el análisis de ordenación, se encuentran los procesos que ocurren por horizonte (Fig.21.b.). A nivel superficial, en ambos sistemas, el carbono soluble, los cationes, el porcentaje de saturación de base y el carbono de la fracción ligera tienden a ser más abundantes que a niveles subsuperficiales, donde la acumulación de arcillas y el aumento de la cantidad de aluminio es favorecida.



**Figura 21.** Análisis de ordenación por componentes principales. Las proyecciones se encuentran sobre el plano del primer y segundo componente principal (factor 1 y 2). a) Proyección de los casos categorizada por tipo de vegetación. b) Proyección de los casos categorizados por horizontes. c) Proyección de las variables.

Las diferencias entre horizontes en cuanto a procesos, quedan también sugeridas por las correlaciones diferenciales encontradas con la profundidad (Tabla A1). Ejemplo de ello es la asociación encontrada entre el Cmic y el Csol solo en el horizonte Bt1, entre el CT y el Pdis solo en el horizonte Bt2, entre CT y el %Ar solo en el horizonte A y entre el pH y el %MO solo en el horizonte A. De manera que entre los cambios esperados está una mayor diferenciación a nivel de profundidad. Nótese que variables cuya significación estadística no se obtuvo en este trabajo, tal como la RB, se muestran en el sistema ordenado con tendencia a la disminución en el bosque.

El rápido crecimiento de *Acacia mangium* se ha manifestado en el aumento del potencial del secuestro de carbono de los suelos de esta sabana. Es esta característica la que destaca a esta especie como promotora del secuestro de carbono ya que se alcanza más rápidamente la “madurez” del sistema, fijando la cantidad de carbono “máxima” en un menor tiempo del que lo haría la sabana natural. A propósito de lo anterior, la sabana testigo presentó valores de MO, CT, biomasa de hojarasca y carbono de la hojarasca superiores a la mayoría de las sabanas de *Trachypogon sp.* en Venezuela. Esto podría sugerir que es posible obtener resultados similares en cuanto al favorecimiento del secuestro de carbono cuando se protege del fuego como lo ha sido en las instalaciones de Petropiar. Como ejemplo de ello, **Hernández-Valencia** (1996) encontró que la cantidad de hojarasca (mantillo) sobre el suelo de una sabana de *Trachypogon sp.* de los llanos centrales venezolanos sometidos a quemadas anuales fue, en promedio,  $32 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , valor muy por debajo del encontrado para la sabana en este trabajo ( $214,75 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ). **Fisher y Thomas** (2004) mostraron que pastos de gramíneas bajo un manejo adecuado pueden alcanzar una productividad primaria aérea de  $33,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  lo cual supera con creces las tasas de acumulación de biomasa reportada para bosques de pinos por **Hoyos** (1998) de  $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . Además, las interacciones bióticas con organismos fijadores de nitrógeno se manifiestan también con la vegetación nativa de la sabana. **Barrios y González** (1971) encontraron que el 87% de 127 especies leguminosas en sistemas de sabana de *Trachypogon*, forman nódulos y establecen relaciones simbióticas con rhizobium. Las bajas tasas de fijación de nitrógeno por la interacción rhizobium-leguminosa en sabanas han sido asociadas al bajo nivel nutricional de los suelos. Sin embargo, las contribuciones de nitrógeno por cianobacterias



(organismos fijadores de nitrógeno de vida libre) son aún más importantes en las sabanas venezolanas (**López-Hernández y col., 2006**).

A todo lo anterior se suma la importante actividad de la macrofauna edáfica en la estructuración de los suelos de sabana, así como en el reservorio de nutriente y carbono. Ejemplo de esto son las lombrices de tierra y la importante producción de coprolitos reportada por **Hernández** (2010) en sabanas venezolanas. En este sentido, es necesario evaluar el cambio en la composición de especies microbianas y de la fauna edáfica en general, a fin de verificar cambios en la biodiversidad funcional de la sabana y concluir con menor incertidumbre sobre los beneficios de la aforestación con *A. mangium*. Y no solo eso, sino también la fauna silvestre que hace vida en la vegetación de sabana, tal como las aves, grupo que durante el muestreo en el bosque de acacia estuvo ausente, a pesar de su aparente invitación al refugio (por su dosel, mayor humedad y menor radiación).

Si bien hoy en día es imperativo el manejo de las sabanas desde el enfoque agroforestal y con criterio de sustentabilidad, la balanza entre la conservación de la biodiversidad, la biofuncionalidad de los ecosistemas de sabana y la necesidad de estrategias de secuestro de carbono, no ha podido ser equilibrada. Por una parte, la recuperación de la materia orgánica y propiedades biológicas de suelos degradados es lenta, mientras que el crecimiento de la humanidad demanda tierras aptas para cultivo y ganadería. De allí que la aforestación con *Acacia mangium* sea una alternativa muy atractiva por su doble beneficio, el secuestro de carbono y el aporte natural de nitrógeno. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que una vez que ha ocurrido la transformación, el nuevo sistema forestal debe mantenerse y conservarse para mantener los beneficios que se persiguen en cuanto al secuestro de carbono.

## CONCLUSIONES

---

- \* La aforestación con *A. mangium* incrementó el secuestro de carbono en los suelos hasta 1 m de profundidad. Ello fue evidente en el aumento de la biomasa de hojarasca, el carbono total, la materia orgánica del suelo, el carbono de la fracción pesada y el carbono microbiano. Si se considera el ecosistema, el secuestro de carbono se acentúa con el evidente aumento de la vegetación leñosa.
- \* A pesar de que el carbono total fue mayor en el bosque, este cambio no se vio reflejado en el carbono asociado a las fracciones ligera y soluble de la materia orgánica. Esta falta de correspondencia puede ser atribuida a limitaciones metodológicas para recuperar y estimar todo el carbono presente en el suelo, a través del fraccionamiento físico de la materia orgánica y la alta variabilidad natural de los datos en el sistema, lo cual enmascara las posibles diferencias.
- \* El C microbiano incrementa en el suelo del bosque, lo que significa un incremento del carbono lábil, fracción más susceptible a la descomposición y liberación de dióxido de carbono. Sin embargo, este componente también es el principal catalizador de la estabilización de la materia orgánica a través de la formación del humus.
- \* Las tasas de mineralización microbiana estimadas a partir de la respiración basal no variaron entre la sabana y el bosque de *A. mangium*, a pesar del aumento del carbono microbiano en todos los horizontes.

- \* El flujo neto de CO<sub>2</sub> del suelo es mayor en la sabana, lo cual coloca al bosque de *A. mangium* como mejor y más activo sumidero de carbono que la sabana, ya que recibe más aportes de materia orgánica al suelo por la vegetación y menor salida de dióxido de carbono a la atmósfera.
  
- \* Con la aforestación el suelo bajo vegetación de *A. mangium* se acidificó, potenciando futuras limitaciones en la disponibilidad de nutrientes, especialmente del fósforo el cual disminuyó en el bosque. Además, el aumento registrado en la materia orgánica y su potencial aumento con el tiempo, indica que el nivel de acidez puede aumentar. Sin embargo, las cantidades de nitrógeno en el bosque son mayores, lo que puede favorecer los procesos de mineralización de carbono y la fertilidad del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Albrecht, A., Kandji, S.T.** 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agr. Ecosyst. Environ.* **99**: 15–27.
- Alef, K. Nannipieri, P.** 1995. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Harcourt Brace & Company. Publishers, 417 pp.
- Allen, S.E., Grimshaw, H.M., Parkinson, J.A., Quarmby, C.** 1974. *Chemical analysis of ecological materials*. Blackwell. Scien. Publ. London.
- Anderson, J.M., Ingram, J.S.I.** 1993. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. 2nd edition, Wallingford UK: CAB International.
- Arai, S., Ishizuka, S., Ohta, S., Ansori, S., Tokuchi, N., Tanaka, N., Hardjono, A.** 2008. Potential N<sub>2</sub>O emissions from leguminous tree plantation soils in the humid tropics. *Global Biogeochemical Cycles* **22**: 20-28.
- Barrios, S. y González, V.** 1971. Rhizobial symbiosis on Venezuelan savannas. *Plant Soil* **34**:707-719.
- Bellamy, P.H., Loveland, P.J., Bradley, R.I., Murray Lark, R., Kirk, G.J.D.** 2005. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature* **437**: 245–248..
- Berroterán, J.** 2004. *Reserva Forestal Imataca: Ecología y Bases Técnicas para el ordenamiento territorial*, Segunda edición. Fundambiente. Caracas, Venezuela.
- Bertora C., Zauattaro L., Sacco D., Monaco S., Grignani C.** 2009. Soil organic matter dynamics and losses in manured maize-based forage systems. *Europ.J.Agronomy* **30**: 177-186.
- Bouillet, J., Laclau, J., Goncalves, J.L., Moreira, M. Z., Trivelin, P., Jourdan, C., Silva, E., Piccolo, M., Tsai, S., Galiana, A.** 2008. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. 2. Nitrogen accumulation in the stands and biological N<sub>2</sub> fixation. Growth dynamics and aboveground net primary production, *Forest. Ecol. Manag.* **255**: 3905–3917.
- Brady, N.** 1996. *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall.
- Breland, T. A., y Eltun, R.** 1999. Soil microbial biomass and mineralization of carbon and nitrogen in ecological, integrated and conventional forage and arable cropping system. *Biol. Fertil. Soils.* **30**: 193-201.
- Bremner, J.M.** 1965. Total nitrogen. En: *Methods of soil analysis part 2*. C.A. Black (ed.). Agronomy 9, Pp 1149-1178. Am. Soc. Of Agrom., Madison, Wisconsin.
- Cairns, M., Baker, J., Shea, R., Haggerty, P.** 1996. Carbon Dynamics of Mexican tropical evergreen forest: influence of forestry mitigation options and refinement of carbon fluxes estimates. *Interciencia* **21**: 216-223
- Campos, A.** 1999. Efecto de la siembra de *Pinus caribbea* L, en fracciones de materia orgánica de un suelo de sabana, Uvero-Edo. Monagas. Tesis de Grado. Universidad Central de Venezuela.
- Casanova E.** 2005. *Introducción a la ciencia del suelo*. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Castro, I.** 2007. Manejo y conservación de la materia orgánica y del nitrógeno en suelos de sabanas bien drenadas. Tesis Postgrado (por presentar). Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Ceccon, E. y Martínez-Ramos, M.** 1999. Aspectos ambientales referentes al establecimiento de plantaciones de eucalipto de gran escala en áreas tropicales: aplicación al caso de México. *Interciencia.* **24(6)**: 352-359.
- Dilly, O., Mogge, B., Kutsh, W.L., Kappen, L., y Munch, J.** 1997. Microbial characteristics and emission of carbon dioxide and nitrous oxide of arable and grassland soils. *Biogeochemistry* **39**: 189-207.

- Dixon, R.K., Andrasko, K.J., Sussman, F.A., Lavinson, M.A., Trexler, M.C., Vinson, T.S.** 1993. Tropical forests: their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water Air Soil Pollut.* **70**: 71–94.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, J.** 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* **263**: 185–190.
- Evans, C. y Kamprath, E. J.** 1970. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al and organic matter content. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **34(6)**:893-869
- FAO.** 2009. Situación de los bosques del mundo, Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. 176 pp.
- Fernández, T.** 2004. La materia orgánica del suelo y el cambio climático global. Discurso de Ingreso, Academia de Farmacia de Galicia. Santiago de Compostela. 75pp.
- Fisher, M.J. y Thomas, R.J.** 2004. Implications of land use change to introduced pastures on carbon stocks in the central lowlands of tropical South America. *Environ. Devel. Sust.* **6**: 111-131.
- Franzluebbers, A.J., Haney, R.L., Mous, F.M. y Zuberer, D.A.** 1998. Actives fractions of organic matter in soil with different texture. Agriculture Research service Textran.
- Gasparotto, E., Malo, D.D, y Gelderman, R.H.** 2003. Impact of Organic Matter Removal on Particle Size Analysis by Pipette and Hydrometer.
- Gómez, I.** 2005. Parámetros microbiológicos y bioquímicos en suelos de los llanos orientales de Venezuela bajo diferente uso de la tierra y prácticas de manejo. Tesis Doctorado. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Caracas-Venezuela.
- González, L., Souto, X., y Reigosa, M.** 1992. Efectos alelopáticos producidos por la especie de *Pinus radiata* D. Don durante el proceso de descomposición en cuatro suelos naturales en Galicia. *Nova Acta científica Compostelana* **3**: 93-100.
- Grace, J., San José, J., Meir, P., Miranda, H.S, y Montes, R.A.** 2006. Productivity and carbón fluxes of tropical savannas. *Biogeogr.* **33**: 387-400.
- Hernández, L.** 2010. Dinámica de producción de coprolitos de lombrices de tierra en la sabana de la estación biológica de los llanos. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas-Venezuela.
- Hernández-Valencia, I.** 1985. Contribución al estudio del balance de carbono en el suelo, en un cultivo de caña de azúcar: desaparición de raíces, desaparición de hojarasca y respiración edáfica. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas-Venezuela.
- Hernández-Valencia, I.** 1996. Dinámica del fósforo en una sabana de *Trachypogon* de los Llanos Altos Centrales Venezolanos, Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Hernández-Valencia, I. y Bautis, M.** 2005. Cambios en el contenido de fósforo en el suelo superficial por la conversión de sabana en pinares. *Bioagro* **17**: 69-78.
- Hoyos, J.F.** 1998. Sembrando petróleo: Sabanas que se transforman en bosques. *Natura* **113**:41-45
- Hugues, R.F., Kauffman, J.B., Cummings, D.L.** 2002. Dynamics of aboveground and soil carbon and nitrogen stocks and cycling of available nitrogen along a land-use gradient in Rondonia, Brazil. *Ecosystems* **5**: 244–259.
- Huntington, T,G.** 1995. Carbon sequestration in an aggrading forest ecosystem in the southeastern USA, *Soil Sci, Soc, Am, J,* **59**: 1459–1467.
- IPCC.** 2000. Land Use Change and Forestry. Special Report. Cambridge Univ. Press. Cambridge.

- IPCC.** 2007. Climate Change 2007: Synthesis report. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Valencia España.
- Jacinthe P.A., Lal, R., Owens, L.B., Hothem, D.L.** 2004. Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics. *Soil Till Res* **77**: 111-123.
- Jiménez, L., Valdés, D., y Alvarez, R.** 2006. Efecto alelopático de *Pinus caribaea* en la germinación de arvenses en casas de cultivo protegido. *Centro agrícola (FAO)* **33(4)**: 79-83
- Kelty, M.J.** 2006. The role of species mixtures in plantation forestry. *Forest. Ecol. Manag.* **233**: 195–204,
- Konda, R., Ohta, S., Ishizuka, S., Arai, S., Ansori, S., Tanaka, N., Hardjono, A.** 2008. Spatial structures of N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> fluxes from *Acacia mangium* plantation soils during a relatively dry season in Indonesia. *Soil Biol. Biochem.* **40**: 3021–3030.
- Krankina, O.N., Dixon, R.K.** 1994. Forest management options to conserve and sequester terrestrial carbon in the Russian Federation. *World Resour. Rev.* **6**: 88–101.
- Laik, R., Kumar, K., Das, D.K., Chaturvedi, O.P.** 2009. Labile soil organic matter pools in a calciorthent after 18 years of afforestation by different plantations. *Appl. Soil Ecol.* **42(2)**:71-78
- Lal, R.** 2004. Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change. *Geoderma* **123**:1-22.
- Lal, R.** 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest. Ecol. Manag.* **220**: 242-258.
- López-Hernández, D., Hernández-Valencia, I. y Güerere, I.** 2008. Cambios en parámetros físicos, químicos y biológicos en el suelo de una sabana protegida de quema y pastoreo durante veinticinco años. *Bioagro* **20(3)**: 151-158.
- López-Hernández, D., Santaella, S. y Chacón, P.** 2006. Contribution of nitrogen-fixing organism to the N budget in *Trachypogon* savannas. *Soil Biology* **42**: 43-50.
- Macedo, M.O., Resende, A.S., García, P.C., Boddey, R.M., Jantalia, C.P., Urquiaga, S., Campello, E.F.C., Franco, A.A.** 2008. Changes in soil C and N stocks and nutrients dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. *Forest. Ecol. Manag.* **255**: 1516-1524.
- Malhi, Y. y Grace, J.** 2000. Tropical forest and atmospheric Carbon Dioxide. *Trends in Ecology and Evolution* **15**: 332-337
- Marschner, H.** 1986. Mineral nutrition of higher plants. Primera edición, quinta impresión. Academic Press, London.
- McDonald, A., Riha, S., DiTommaso, A., DeGaetano, A.** 2009. Climate Change and geography of weed damage: Analysis of U.S. maize systems suggests the potential for significant range transformations. *Agr. Ecosyst. Environ.* **130**: 131-140.
- McVay, K.A., Rice, C.W.** 2002. Soil Organic Carbon and the Global Carbon Cycle. Kansas State University, Manhattan.
- Medina, E. y Zelwer, M.** 1972. Soil respiration in tropical plant communities. En: papers from a symposium on tropical ecology with emphasis on organic productivity. Golley, P.M y Golley, F.B. University of Georgia. Athens.
- Naciones Unidas.** 1998. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 25pp.
- Nair, R., Nair, D., Kumar, M., Haile, G.** 2009. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environ. Sci. Policy* **(8)**:1099-1111.

- Nannipieri, P.** 1994. The potential use of enzymes as indicator of productivity, sustainability and pollution. In: Pankurst, C. E., Double, B. M., Gupta, V.V. y Grace, P.R. (eds). *Soil Biota, Management in sustainable farming systems*. CSIRO. Melbourne. 238-244.
- Odum E.** 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* **164**: 262-270.
- Olsen, S.R, y Sommers L.** 1982. Phosphorus. In: Methods of soil analysis, part 2. Chemical and microbiological properties. In: Page, A.L., Miller, R.H. y Keeney, D. R. (Eds,) *Agronomy Series* **9**: 403-430.
- Palm, C., Sanchez, P., Ahamed, S. y Awiti, A.** 2007. Soils: A contemporary perspective. *Annu. Rev. Environ. Resoure.* **32**: 99-129.
- Parton, W.J., Schimel, D.C., Cole, C.D., Ojima D.S.** 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in the Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **51**: 1173-1179,
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Nyakuengama, P.K., Khanna, P.K.** 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest. Ecol. Manag.* **168**: 241–257.
- Petropiar.** 2006. Caracterización Ecofisiológica de Especies Forestales: *Acacia mangium, Pinus caribaea* var. Avance de resultados.
- Phiri, S., Barrios, E., Rao, I.M. y Singh, B.R.** 2001. Changes in soil organic matter and phosphorus fractions under planted fallow and crop rotation system on a Colombian volcanic-ash soil. *Plant and Soil* **231(2)**: 211-223.
- Prentice, I.C.** 2001. The carbon cycle and the atmospheric carbon dioxide. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press. UK. 183– 237 pp.
- Ramia, M.** 1967. Tipos de sabana en los llanos de Venezuela. *Bol. Soc. Venez. Cienc. Nat.* **27(112)**: 264-288.
- Resh, S.C., Binkley, D., Parrotta, J.A.** 2002. Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with Eucalyptus species. *Ecosystems* **5**: 217–231.
- Ricklefs, R.E. y Miller G.L.** 2000. *Ecology*. Cuarta Edición.
- Roberts, R.** 2000. *Asuntos Forestales: Los Bosques tropicales y los cambios climáticos*. Agencia Canadiense para el desarrollo internacional. Canadá. 17pp.
- Rondón, M., Acevedo, D., Hernández, R.M., Rubiano, Y., Rivera, M., Amezquita, E., Romero, M., Sarmiento, L., Ayarza, M., Barrios, E., Rao, I.** 2006. *Carbon sequestration soil of Latin America*. The Haworth Press. Inc. New York. London. Oxford.
- Rudel, T.K.** 2009. Tree farms: Driving forces and regional patterns in the global expansion of forest plantations. *Land Use Policy* **26**: 545-550.
- San José, J., Montes, R. y Fariñas, M.** 1998. Carbon Stocks and fluxes in a temporal caling from savanna to a semideciduos forest. *Forest Ecology and Managment* **105**: 251-262.
- San José, J.J. y Montes, R.A.** 2003. Neotropical savanna converted to food cropping and cattle feeding systems: soil carbon and nitrogen changes over 30 years. *Forest. Ecol. Manag.* **184**: 17-32
- Saviozzi, A., Levi-Minzi, E., Cardelli, R., Riffaldi, R.** 2001. A comparison of soil quality in adjacent cultivated forest and native grassland soils. *Plant Soil* **233**:251-259.
- Schlesinger, W. H.** 1997. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*, New York: National Academic Press.
- Taiz, L. y Zeiger, E.** 2002. *Plant Physiology*. Third Edition. Sinauer Associates. Inc. publishers.
- Theng, B., Tate, K. y Sollins, P.H.** 1989. Constituents of organic matter in temperate and tropical soil. In: *Dinamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. D. Coleman, J.M. Oades and G., Uehara (edit). NIFTAL proyect. Honolulu, Hawaii.

- U.S.D.A.** 2006. Soil Survey Laboratory Methods and Procedures for Collecting Soil Samples. Traducción al español. Edit. Trillas.
- Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S.** 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* **19**: 703-707
- Verchot, L., Brienza, S.J., Oliveira, C., Mutegi, K., Catânio, H., Davindson, A.** 2008. Fluxes of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NO and N<sub>2</sub>O in an improved fallow agroforestry system in eastern Amazonia. *Agr. Ecosyst. Environ.* **126**: 113-121.
- Villarroel, G.** 1993. El proceso de descomposición en los pinares de Uverito (Monagas-Venezuela). Trabajo de ascenso para optar a la categoría de agregado de la Universidad Central de Venezuela. 50pp.
- Wang, Y., Hsieh, Y.P.** 2002. Uncertainties and novel prospects in the study of the soil carbon dynamics. *Chemosphere* **49**: 791–804.
- Winjum, J.K., Dixon, R.K., Schroeder, P.E.** 1992. Estimating the global potential of forest and agroforest management practices to sequester carbon. *Water Air Soil Pollut.* **64**: 213–228.
- Yamashita, N., Ohta, S., Hardjono, A.** 2008. Soil changes induced by *Acacia mangium* plantation establishment: Comparison with secondary forest and *Imperata cylindrical* grassland soils in South Sumatra, Indonesia. *Forest Ecol. Manage.* **254**: 362–370.
- Yang, L., Liu, N., Ren, H., Wang, J.** 2009. Facilitation by two exotic *Acacia*: *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium* as nurse plants in South China. *Forest Ecol. Manage.* **257(8)**: 1786-1793.
- Zinck, A. y Urriola, P.** 1970. Origen y evolución de la Formación Mesa: Un enfoque edafológico. MOP, Dirección General de Recursos Hidráulicos. División de Edafología. Barcelona, Venezuela. 70p.

### Consultas en Línea

1. **FRA, 2005.** Global Forest Resource Assessment. Change in forest plantations: 1990–2005. Planted forest in 2005. En: <http://www.fao.org/forestry/site/fra2005/en/> [Consulta: Abril 2009].
2. **CONAFOR.** Comisión Nacional Forestal. Paquetes tecnológicos: <http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/secciones/reforestacion/Fichas%20Técnicas/Acacia%20mangium.pdf>, [Consulta: Mayo 2010].
3. **UBA.** 2001. Principios de Edafología, con énfasis en suelos argentinos. Editorial, Facultad de Agronomía. En: <http://www.agro.uba.ar/carreras/agronomia/materias/edafo/biblio>. [Consulta: Junio 2010].





Figura A1. Vista general de las zonas estudiadas.



**Figura A2.** Vista general de la sabana estudiada. A) desde la estrada a la sabana por la carretera de acceso. B) una vez dentro de la sabana.



**Figura A3.** Vista panorámica del bosque de *Acacia mangium* estudiado.



**Figura A4.** Detalle del suelo en el bosque de *A. mangium*. A) vista desde arriba del suelo. Se observa hojarasca, semillas y la estructura de hongo. B) detalle del cuerpo fructífero del hongo. La foto fue tomada al ras del piso.



**Figura A5.** Ejemplar de escorpión observado en el bosque de *A. mangium*

**Tabla A1.** Correlación por estrato, entre algunas de las variables estudiadas en la sabana y el bosque de *A. mangium*. Se muestran los coeficientes de correlación significativos ( $p < 0,05$ ) en rojo.  $n=12$ .

ESTRATO 1										
	CFP	CFL	Csol	Cmic	FP	FL	Ph	%Ar	Pdis	qCO2
CT	-0.10	0.39	-0.49	0.06	-0.01	0.34	-0.61	-0.74	-0.38	0.23
CFP	1.00	0.34	0.20	0.25	-0.03	0.21	-0.26	0.02	-0.27	-0.28
CFL	0.34	1.00	-0.31	-0.08	-0.36	0.97	-0.48	-0.54	-0.36	0.15
%MO	-0.10	0.39	-0.49	0.06	-0.01	0.34	-0.61	-0.74	-0.38	0.23
Csol	0.20	-0.31	1.00	-0.29	-0.45	-0.34	0.53	0.89	0.62	0.00
Cmic	0.25	-0.08	-0.29	1.00	0.55	-0.15	-0.37	-0.16	-0.69	-0.68
Ph	-0.26	-0.48	0.53	-0.37	-0.21	-0.38	1.00	0.69	0.58	-0.26
%Ar	0.02	-0.54	0.89	-0.16	-0.28	-0.49	0.69	1.00	0.67	-0.18
Pdis	-0.27	-0.36	0.62	-0.69	-0.33	-0.27	0.58	0.67	1.00	0.33
qCO2	-0.28	0.15	0.00	-0.68	-0.33	0.14	-0.26	-0.18	0.33	1.00
Acidez	-0.01	0.38	-0.45	0.33	0.31	0.28	-0.76	-0.66	-0.44	0.26
ESTRATO 2										
CT	-0.21	-0.26	0.61	0.20	-0.17	-0.10	-0.50	-0.32	-0.53	0.19
CFP	1.00	0.07	-0.37	0.10	-0.27	0.13	-0.10	0.05	-0.15	0.00
CFL	0.07	1.00	-0.47	-0.35	-0.32	0.97	0.38	-0.18	0.28	0.57
%MO	-0.21	-0.26	0.61	0.20	-0.17	-0.09	-0.50	-0.32	-0.53	0.19
Csol	-0.37	-0.47	1.00	0.65	0.25	-0.43	-0.14	-0.36	-0.37	-0.22
Cmic	0.10	-0.35	0.65	1.00	0.43	-0.40	-0.17	-0.38	-0.25	-0.54
Ph	-0.10	0.38	-0.14	-0.17	-0.43	0.34	1.00	0.23	0.84	0.39
%Ar	0.05	-0.18	-0.36	-0.38	-0.32	-0.17	0.23	1.00	0.38	-0.03
Pdis	-0.15	0.28	-0.37	-0.25	-0.36	0.24	0.84	0.38	1.00	0.35
qCO2	0.00	0.57	-0.22	-0.54	-0.75	0.73	0.39	-0.03	0.35	1.00
Acidez	0.07	0.07	-0.15	-0.24	-0.35	0.04	0.80	0.47	0.55	0.11
ESTRATO 3										
CT	-0.11	-0.27	-0.27	0.46	0.33	-0.38	-0.50	-0.31	-0.68	0.13
CFP	1.00	0.75	-0.10	-0.45	-0.67	0.75	0.44	0.48	-0.03	-0.53
CFL	0.75	1.00	-0.01	-0.01	-0.64	0.97	0.27	0.40	0.03	-0.33
%MO	-0.11	-0.26	-0.27	0.46	0.33	-0.38	-0.50	-0.31	-0.68	0.13
Csol	-0.10	-0.01	1.00	0.07	0.00	0.02	0.01	-0.19	0.46	-0.12
Cmic	-0.45	-0.01	0.07	1.00	0.20	-0.11	-0.39	-0.19	-0.19	0.28
Ph	0.44	0.27	0.01	-0.39	-0.45	0.28	1.00	0.51	0.71	-0.62
%Ar	0.48	0.40	-0.19	-0.19	-0.77	0.46	0.51	1.00	0.17	-0.49
Pdis	-0.03	0.03	0.46	-0.19	-0.21	0.08	0.71	0.17	1.00	-0.48
qCO2	-0.53	-0.33	-0.12	0.28	0.53	-0.27	-0.62	-0.49	-0.48	1.00
Acidez	0.55	0.43	-0.19	-0.38	-0.77	0.38	0.70	0.59	0.44	-0.75