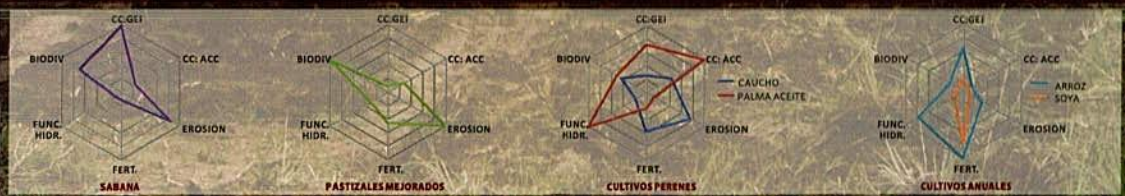


## CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES DE ECOEFICIENCIA PARA LA ALTILLANURA PLANA EN LOS MUNICIPIOS DE PUERTO LÓPEZ Y PUERTO GAITÁN, DEPARTAMENTO DEL META



# CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES DE ECOEFICIENCIA PARA LA ALTILLANURA PLANA EN LOS MUNICIPIOS DE PUERTO LÓPEZ Y PUERTO GAITÁN, DEPARTAMENTO DEL META

Convenio MADR-Corpoica-CIAT. 2011-2012



MinAgricultura  
Ministerio de Agricultura  
y Desarrollo Rural

PROSPERIDAD  
PARA TODOS

## Autores

Nubia Stella Rodríguez<sup>1</sup>, Patrick Lavelle<sup>2</sup>, Sandra Xiomara Pulido C.<sup>1</sup>, Albert Julesmar Gutiérrez V.<sup>1</sup>,  
Jaime H. Bernal R.<sup>1</sup>, Orlando Argüello Tovar<sup>1</sup>, César Botero<sup>1</sup>, Yolanda Gómez<sup>1</sup>, María del Pilar Hurtado<sup>2</sup>,  
Sandra Patricia Loaiza<sup>2</sup>, Edgar Rodríguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Investigadores de Corpoica. Centro de Investigación La Libertad. Villavicencio, Meta. Colombia. nrodriguez@corpoica.org.co

<sup>2</sup>Investigadores del Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. Cali, Valle del Cauca. Colombia.

Rodríguez, Nubia Stella; Lavelle, Patrick; Pulido C., Sandra Xiomara; Gutiérrez V., Albert Julesmar; Bernal R., Jaime H.; Argüello Tovar, Orlando; Botero, César; Gómez, Yolanda; Hurtado, María del Pilar; Loaiza, Sandra Patricia; Rodríguez, Edgar / Construcción de indicadores de ecoeficiencia para la altillanura plana en los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán, departamento del Meta. Villavicencio (Colombia): CORPOICA, 2013. 40 p.

Palabras clave: AGROECOSISTEMAS, SERVICIOS DE LOS ECOSISTEMAS, SOSTENIBILIDAD, INDICADORES, META- COLOMBIA

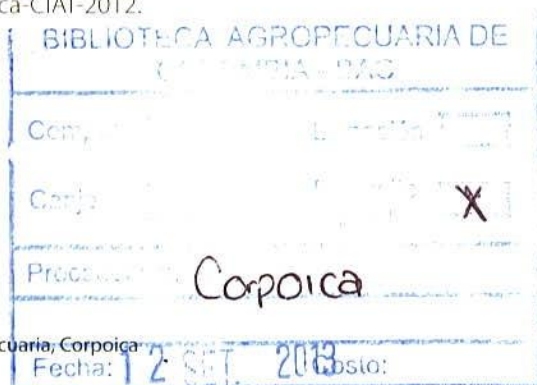
## Convenio MADR-Corpoica-CIAT. 2011-2012



Esta publicación es un resultado del proyecto *Indicadores de eficiencia en el uso de los recursos biofísicos, socioeconómicos y ambientales de sistemas productivos de la Altillanura plana orinocense*, ejecutado por investigadores de Corpoica y el CIAT, en 2011, y su impresión es posible gracias a los recursos del convenio MADR-Corpoica-CIAT-2012.



© Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica  
Cl, La Libertad, Villavicencio, Meta, Colombia



ISBN: 978-958-740-153-0  
CA: C04320  
CUI: 1448  
Boletín de investigación No.: 19  
Edición: César Augusto Jaramillo S., Investigador de Transferencia de Tecnología.  
Corpoica C.I. La Libertad.  
Fotografías: Los autores  
Primera edición: Junio de 2013  
Tiraje: 1000 ejemplares

Línea de atención al cliente: 018000121515  
atencionalcliente@corpoica.org.co  
www.corpoica.org.co

Impreso en Colombia  
Printed in Colombia

La presente publicación ha sido elaborada con la cofinanciación del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, MADR. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva de los investigadores y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista del MADR.

## PRESENTACIÓN

Desde la década del setenta, el término *ecoeficiencia* ha sido adaptado a una gran cantidad de actividades productivas de la sociedad, centrado en la medición del progreso o crecimiento respecto a los bienes y servicios naturales que se producen o se consumen, bajo la premisa de generarlos utilizando menos energía y recurso.

Los índices de eficiencia en la producción agrícola están determinados por la capacidad productiva de los cultivos adaptados a la oferta ambiental natural disponible. Sin embargo, no están definidos los indicadores que permitan comparar la eficiencia de uso de los recursos naturales frente a diversos sistemas productivos agrícolas y su manejo, con beneficio recíproco de sostenibilidad ambiental, económica y social.

El presente documento contiene los resultados de la investigación realizada para determinar algunos indicadores relacionados con la ecoeficiencia en cuatro sistemas de producción agrícola comparados con las sabanas nativas en la Altilanura plana departamento del Meta. Las mediciones realizadas en el año 2011 presentan una alternativa metodológica para comparar los cambios de las propiedades físicas, químicas y biológicas en el suelo, la emisión de gases de efecto invernadero y la producción de biomasa aérea, con la rentabilidad económica y el capital social vinculado a cada sistema productivo.

El estudio contempló a la sabana nativa de la Altilanura como sistema de producción referente para determinar la condición natural, y la evaluación de sistemas transitorios como arroz, maíz y soya, de pasturas mejoradas y cultivos permanentes de caucho y palma de aceite, como cultivos introducidos al ecosistema. Entre los resultados obtenidos se encontraron ventajas de cada sistema frente a determinado indicador, lográndose un mosaico de opciones para alcanzar el nivel de ecoeficiencia esperado.

El objetivo final de los indicadores de ecoeficiencia es proporcionar a productores, tomadores de decisión, gestores de desarrollo y demás actores, una herramienta práctica para medir su desempeño con respecto al uso de recursos e incorporar este concepto en la definición de políticas socioeconómicas relacionadas con la sostenibilidad ambiental. Resultados que fueron posible gracias al convenio de cooperación técnico científica MADR-Corpoica-CIAT, como estrategia del gobierno nacional para contribuir con el desarrollo armónico de la Orinoquia colombiana.

RUBÉN ALFREDO VALENCIA RAMÍREZ  
*Director C.I. La Libertad  
Corpoica*

## CONTENIDO

<b>Resumen</b>	6
<b>Introducción</b>	7
<b>Materiales y métodos</b>	9
<b>Resultados y discusión</b>	16
• Indicador de fertilidad de suelos	16
• Indicador de funciones hídricas	20
• Indicador de biodiversidad (macrofauna del suelo)	23
• Indicador de regulación climática	25
• Indicador de estabilidad estructural del suelo	26
• Comparación general de los servicios ecosistémicos en los diferentes sistemas de uso	29
• Indicador socioeconómico	31
<i>Cultivos transitorios</i>	31
<i>Cultivos permanentes</i>	33
<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	35
<b>Bibliografía</b>	37

## RESUMEN

Para contribuir a la implementación de herramientas que permitan el diseño de un territorio ecoeficiente en la Altillanura colombiana, se inició durante el año 2011 el levantamiento de información para construir indicadores de ecoeficiencia. Se midieron variables físico-químicas y macrofauna del suelo, gases con efecto invernadero (GEI), y almacenamiento de carbono en 75 parcelas localizadas en 41 fincas a lo largo de un transecto entre Puerto López y Carimagua, en el departamento del Meta, Colombia. Se evaluaron los sistemas productivos: pastura mejorada, cultivos transitorios (arroz, soya y maíz) y cultivos permanentes (caucho y palma de aceite), con respecto a la sabana natural. Se construyeron seis indicadores con variaciones calibradas entre 0,1 y 1,0, asociados con los servicios ecosistémicos de fertilidad de suelos, las funciones hídricas, la biodiversidad (macrofauna de suelo), la regulación climática en sus componentes de almacenamiento de carbono y flujos de GEI y la estabilidad estructural del suelo.

Adicionalmente, se inició un proceso de recolección de información para realizar la caracterización socioeconómica de las fincas, el cual debe continuar. Cada indicador separó los sistemas de uso de forma altamente significativa, permitiendo caracterizar las fortalezas y debilidades de cada uno. La pastura mejorada, en promedio aumenta la abundancia de la biodiversidad de la macrofauna y la agregación del suelo en comparación con la sabana natural; la palma de aceite mejora las funciones hídricas del suelo y el almacenamiento de C y los cultivos anuales mejoran la fertilidad. Cada sistema de uso tiene la capacidad de mejorar por lo menos uno de los servicios ecosistémicos medidos, presentando la opción de organizar mosaicos de elementos complementarios en el espacio de las fincas y en rotaciones temporales.

## INTRODUCCIÓN

La ampliación de la frontera agrícola planteada para la Alltillanura colombiana es una oportunidad para aumentar la producción de bienes y servicios de forma sostenible en los sistemas propuestos. La ocupación de nuevos espacios con poca planificación en el uso del territorio; la falta de conocimiento integral del funcionamiento del paisaje y de su potencialidad; las políticas económicas de corto plazo, sumadas a la falta de conocimiento sobre la oferta ambiental del territorio y sus ecosistemas, constituyen elementos que pueden conducir a la degradación de las funciones productivas y ambientales de los suelos y el aire, llevando a la inviabilidad económica de los sistemas productivos y al deterioro de la condición social de sus pobladores.

Para que el desarrollo sostenible de la Alltillanura sea posible, se deben considerar tres grupos de elementos clave: el primero, relacionado con el aspecto económico, la productividad y la rentabilidad de las fincas; el segundo, con la creación de condiciones favorables para el acceso a elementos de bienestar humano (educación, seguridad, salud y recursos básicos), y el tercero, con la conservación de la biodiversidad y con la capacidad de los ecosistemas agrícolas y naturales para producir servicios ambientales.

Una agricultura que utilice los recursos más eficazmente para generar incrementos sostenibles de productividad (que sea económicamente competitiva y rentable), que disminuya la degradación de los recursos naturales (que promueva la resiliencia y la sostenibilidad) y que contribuya a la creación de oportunidades de desarrollo en zonas rurales (que sea equitativa y justa), es una agricultura considerada ecoeficiente.

Sin embargo, el manejo de las funciones ambientales presenta cierto grado de dificultad a la hora de evaluarlas, con el fin de calcular un valor monetario que las represente y así lograr diseñar políticas ambientales con base en un sistema de pago o compensación. Es por esta razón que el primer paso para consolidar

cualquier política de lineamientos para el uso sostenible del territorio es la construcción de herramientas cuantitativas de evaluación. Con el propósito de contribuir al análisis y a la búsqueda de soluciones a la problemática planteada, en una primera etapa se inició la construcción de indicadores asociados con la ecoeficiencia de cuatro sistemas productivos relacionados con la sabana nativa en la Altillanura plana del departamento del Meta.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se definieron parcelas de cultivos en 41 fincas correspondientes a cultivos transitorios: maíz (TM), soya (TS), arroz (TA), pradera mejorada (PM); a cultivos perennes: caucho (C) y palma de aceite (PA); y áreas con sabana natural (SN), para llevar a cabo los muestreos en la zona comprendida en un transecto entre Puerto López, Puerto Gaitán y Carimagua, en la Altillanura plana del departamento del Meta.

El área de estudio presenta gradientes en parámetros climáticos, tales como: distribución de la precipitación y de la humedad relativa que da lugar a cuatro unidades (Gobernación del Meta & IGAC, 2004):

- B1, catalogada como ligeramente húmeda, con un factor de humedad entre 21 y 40, precipitación entre 1900 mm y 2200 mm, y temperatura superior a 26,6°C, que corresponde al sector de Carimagua, límite con el departamento del Vichada.
- B2, moderadamente húmeda, con factor de humedad entre 41 y 60, precipitación entre 2100 mm y 2300 mm, y temperatura entre 25,0°C y 25,3°C.
- B3, húmedo, factor de humedad entre 61 y 80, precipitaciones entre 2600 mm y 2800 mm, y temperatura entre 26,0°C y 26,2°C.
- B4, muy húmedo, factor de humedad entre 81 y 100, precipitaciones entre 2700 mm y 2800 mm, y temperatura entre 24,8°C y 26,0°C, sector de Puerto López.

Los sistemas se localizaron en la unidad de suelos de Altiplanicie o Altillanura plana, de acuerdo con IGAG (2004), y se encontraron tres unidades de suelos AVCa, AVDa y AVEb, que en términos generales se diferencian en que la primera presenta un clima edáfico-údic<sup>1</sup>, y las otras unidades, un clima edáfico ústico. Los sistemas también se ubicaron en microcuencas diferentes, una que tiene recarga de acuíferos de la zona de montaña, tales como ríos y drenajes del sector sur del río Meta y otras microcuencas que nacen en la Altillanura, tales como la de los ríos Yucao, Guarrojo y Muco. Se localizaron 75 sitios, 15 para cada sistema productivo, con tres puntos de medición en cada sitio y distanciados mínimo 200 m, para un total de 225 puntos, que fueron georreferenciados (Figura 1).

1 El régimen de humedad údico está definido por el balance hídrico de la zona, en el cual se aprecia un periodo seco o de muy bajas precipitaciones entre enero y marzo. Sin embargo, el suelo no permanece seco por 90 días acumulados en el año, ya que la suma de la humedad almacenada, más la precipitación, no es menor a la evapotranspiración en más de 90 días; mientras que el ústico implica un régimen de humedad que está limitado.

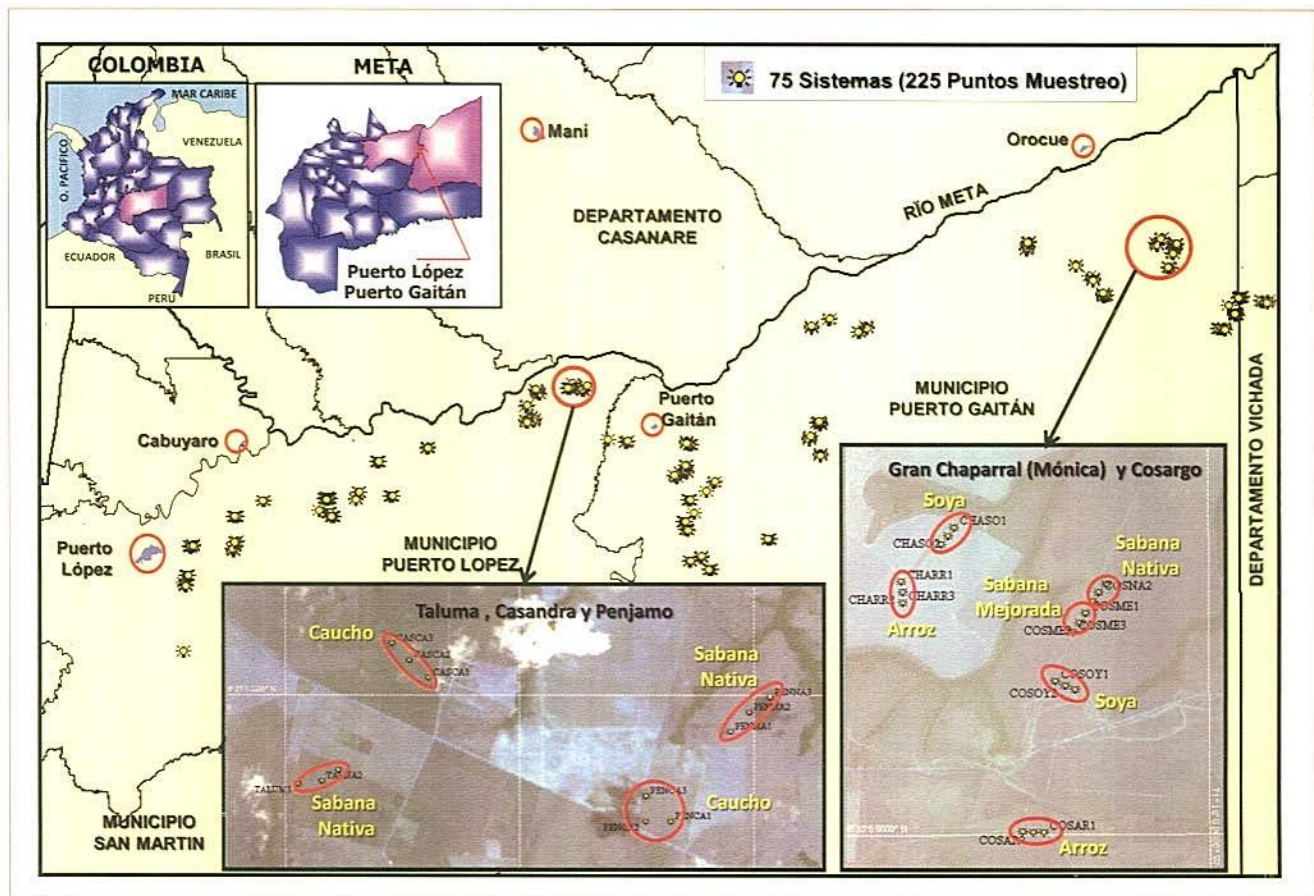


Figura 1. Ubicación de algunos de los sistemas bajo estudio. Municipios de Puerto López y Puerto Gaitán, en el departamento del Meta.

Se midieron parámetros tanto bióticos como abióticos del suelo: GEI, macrofauna, físicos y químicos; adicionalmente se determinó la producción de biomasa aérea.

### Muestreo químico y físico asociado con indicadores de fertilidad y función hídrica del suelo

Se tomaron muestras de suelo (Figura 2) a dos profundidades: 0 a 10 cm y 10 a 20 cm, en cada uno de los 225 puntos.



Figura 2. Toma de muestras para química y física de suelos.

En la Tabla 1 se registran tanto las variables químicas determinadas, así como la metodología utilizada. Estas variables fueron analizadas en el Laboratorio de Servicios Analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT, en Palmira.

Tabla 1. Propiedades químicas y metodologías usadas

Variable	Método utilizado
pH relación 1:1 (agua: suelo)	Potenciómetro
S (mg/kg)	Azufre extractable (Fosfato Ca). Turbidimetría
Materia orgánica	Walkley-Black – Espectrometría molecular
K (cmol/kg)	Potasio intercambiable. Espectrometría de absorción atómica
Ca (cmol/kg)	Calcio intercambiable. Espectrometría de absorción atómica
Mg (cmol/kg)	Magnesio intercambiable. Espectrometría de absorción atómica
Al (cmol/kg)	Aluminio cambiante (KCl 1M). Volumetría
Na (cmol/kg)	Sodio intercambiable. Espectrometría de absorción atómica
CIC (cmol/kg)	Capacidad de intercambio catiónico (Amonio acetato). Volumetría
B (mg/kg)	Espectrometría molecular
Fe (mg/kg)	Hierro extractable. Doble ácido Ab. At. Espectrometría de absorción atómica
Mn (mg/kg)	Manganeso extractable. Doble ácido Ab. At. Espectrometría de absorción atómica
Cu (mg/kg)	Cobre extractable. Doble ácido Ab. At. Espectrometría de absorción atómica
Zn (mg/kg)	Zinc extractable. Doble ácido Ab. At. Espectrometría de absorción atómica

El listado de los parámetros físicos determinados se relaciona en la Tabla 2. Adicionalmente, se calculó el agua disponible, la porosidad total y el porcentaje de distribución por tamaño de los mismos (macroporos, mesoporos y microporos). Como prueba adicional, se evaluó la resistencia mecánica a la penetración, utilizando un penetrógrafo.

**Tabla 2.** Relación del análisis de las características físicas del suelo y su metodología

Análisis	Método	Detalle
Conductividad hidráulica	Carga constante	
Curva hidrofísica	Ollas a presión	Característica del suelo en muestras sin disturbar, recolectadas en un cilindro
Densidad aparente	Cilindro de volumen conocido	
Densidad real	Balón	
Contenido de humedad en el suelo	Gravimétrico	
Textura por Bouyoucos	Hidrómetro	Característica del suelo en muestras disturbadas, recolectadas en bolsa
Estabilidad estructural (DPM)	Yoder	

### Muestreo de macrofauna asociado al indicador de biodiversidad

El muestreo se realizó siguiendo la metodología del TSBF (Anderson & Ingram, 1993; Ruiz *et al.*, 2008), con base en la cuantificación de la densidad de población (individuos  $m^{-2}$ ), la biomasa (gramos  $m^{-2}$ ) y la distribución vertical de las poblaciones por estratos, además de agrupar a los invertebrados en unidades taxonómicas (binomio), a nivel de clase, orden, familia y especie. El protocolo seguido incluyó la validación realizada por Ruiz *et al.* (2008). En horas de la mañana y hasta el mediodía se capturaron y recolectaron invertebrados visibles al ojo humano, de la totalidad del suelo contenido en cada monolito de 25 cm x 25 cm x 10 cm, cortado a dos profundidades: 0-10 cm y 10-20 cm (Figura 3).



**Figura 3.** Ubicación y manejo del marco metálico para el muestreo y la disposición de la muestra de suelo.

Después de recolectadas las muestras se realizó una separación detallada de insectos, lombrices, larvas, gusanos y huevos. Las lombrices se depositaron en recipientes con formol al 4%, para su posterior identificación y clasificación; los demás insectos se depositaron en alcohol etílico al 70%.

## Medición de gases efecto invernadero (GEI) asociados al indicador de regulación climática

En cada parcela, sistema de referencia y punto de muestreo se evaluaron los flujos de gases de efecto invernadero (GEI), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) generados por el suelo. Los muestreos se efectuaron entre junio y septiembre de 2011. Se utilizó la técnica de la cámara cerrada con desfogue (Conen y Smith, 1998); IAEA, 1992, citado por Rondón, 2002), con la estandarización realizada por el CIAT (Chu, H. *et al.*, 2007). De cada una de las cámaras y en cada fecha de muestreo se tomaron tres muestras individuales de aire; una, antes de colocar la tapa que corresponde al tiempo 0 y luego cada 20 minutos hasta completar 40 minutos (Figura 4).

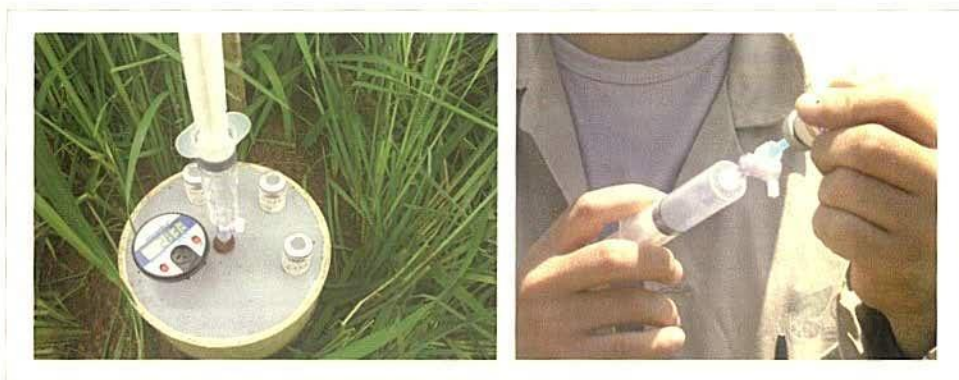


Figura 4. Cámara instalada para la toma de muestras, la disposición y el almacenamiento de la muestra.

Las muestras colectadas, un total de 2700, se analizaron en un cromatógrafo de gases (ShimadzuGC-14A), equipado con un detector de ionización de llama (FID) para el análisis de metano y con un detector de captura de electrones (ECD), para el análisis de óxido nitroso. Para la determinación de las concentraciones de  $\text{CO}_2$  se utilizó un analizador de gases Qubit Systems S151 con detección infrarroja (IRGA). Para la determinación de las concentraciones se utilizaron estándares Scotty de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono, balanceados con nitrógeno, con un análisis de precisión de  $\pm 5\%$ . Finalmente, con las concentraciones que registran los equipos, las temperaturas tomadas en campo, el volumen de la cámara de muestreo y la ecuación de los gases ideales, se obtuvieron los flujos netos de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso para cada uno de los tiempos de muestreo.

## Determinación de carbono en biomasa aérea de los cultivos. Indicador de control climático

En cada punto de muestreo en los cultivos transitorios (soya, arroz y maíz) y en las pasturas, tanto mejorada como nativa, se tomaron muestras de biomasa

vegetal, utilizando un marco de PVC de 50 cm x 50 cm, para determinar el contenido de carbono en el tejido vegetal (Figura 5A). Cada muestra fue pesada en una balanza de campo con precisión de  $\pm 0,01\text{g}$  y luego llevada a peso constante en un horno a  $60^{\circ}\text{C}$ ; se relacionó el peso seco, el área del marco multiplicado por 0,5 para transformar toneladas de biomasa seca a toneladas de carbono por hectárea (MacDicken, 1997). En los cultivos permanentes (caucho y palma) se siguió la metodología de McDicken (1997), delimitando un área de 35 m X 35 m alrededor de cada punto, para ajustar un área de muestreo de 1225  $\text{m}^2$ ; a los árboles que quedaban incluidos dentro del cuadro se les registró la altura utilizando un hipsómetro LáserAce® y el diámetro del tallo a la altura del pecho (DAP) (Figura 5B). Se emplearon las ecuaciones alométricas de Snowdon (2002) para caucho, y de Frangi y Lugo (1985) para palma, con el fin de estimar la biomasa de estas especies. La biomasa obtenida fue multiplicada por 0,5 para estimar el contenido de carbono (IPCC, 2007).



**Figura 5.** A, línea superior, muestras de biomasa en sistemas de soya y sabana nativa. B, línea inferior, medición de altura a través de un hipsómetro y DAP de tallo, respectivamente.

### Determinación de las condiciones socioeconómicas asociadas al indicador socioeconómico

La metodología para obtener información que contribuyera desde una perspectiva social y económica a la construcción del indicador de ecoeficiencia, con-

sistió en tomar como unidad de análisis “el cultivo”, desde una dimensión local y la parcela como objeto de análisis del predio determinado, y en diseñar una estrategia de acopio y revisión de la información de la fuente primaria, referida a las parcelas, a partir del diseño de un instrumento para la toma de información para cada sistema productivo, el cual contempló variables que contribuyeran a empezar el análisis de la eficiencia económica, tecnológica, ambiental y social, para la construcción de los indicadores social y económico.

### **Determinación de la morfología del suelo. Indicador de estabilidad estructural del suelo**

La presencia de agregados de origen físico o biogénico de diferentes tamaños, haciendo parte de la estructura del suelo, están relacionados con sus características hidráulicas, así como de la capacidad de almacenamiento de carbono. En la medida que primen los agregados biogénicos se considera el suelo con mejor regulación biológica. La metodología utilizada para las muestras de cada uno de los puntos fue la referida por Velásquez, *et al.*, (2007), e involucra básicamente la separación suave y cuidadosa de la tierra en agregados pequeños, medianos y grandes tanto de origen biogénico como el producido por procesos físico-químicos.

#### **Metodología estadística**

Para la construcción de los indicadores se utilizó el análisis estadístico de componentes principales (ACP), que explica la mayor parte de la variabilidad del conjunto de datos originales (Castaño y Moreno, 1994). Se redujo la dimensión del espacio de los datos, permitiendo realizar descripciones sintéticas, como combinación lineal que resume el conjunto de características, ya sean químicas, físicas o biológicas más importantes, con valores ajustados entre 0,1 para la peor y 1,0 para la mejor (Velásquez *et al.*, 2007). Se utilizó la librería ADE4 1.4.5. (Análisis de datos ecológicos y ambientales con procedimientos exploratorios euclidianos) del programa R, caracterizado por su funcionalidad, buenas herramientas para la producción de gráficas de calidad y libre acceso. La prueba estadística aplicada fue la prueba de Montecarlo.

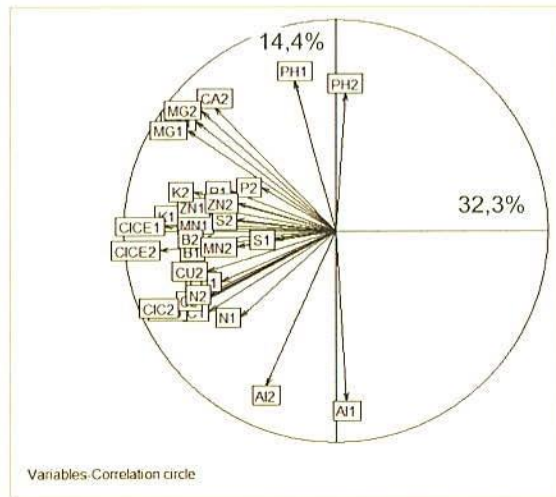
En su orden, el proceso seguido para generar el indicador en cada caso fue el de determinar inicialmente el número de componentes y el porcentaje con que contribuyen a la varianza total, generar el círculo de correlación; posteriormente, y dependiendo del factor a analizar, sea finca, sistema o localidad, se corrió el test de Montecarlo para determinar cuánto de la variación total observada es explicada por el factor en cuestión. Por último, generar los vectores propios para cada componente, con el fin de identificar la contribución de cada variable, para construir con las de mayor valor el indicador.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Indicador de fertilidad de suelos

El indicador químico propuesto se relaciona con las variables que afectan las relaciones suelo-planta, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos. Los análisis químicos incluidos en el análisis estadístico fueron aquellos determinados en cada uno de los 225 puntos a las profundidades 0-10 cm, 10-20 cm, excluyendo aquellas variables derivadas.

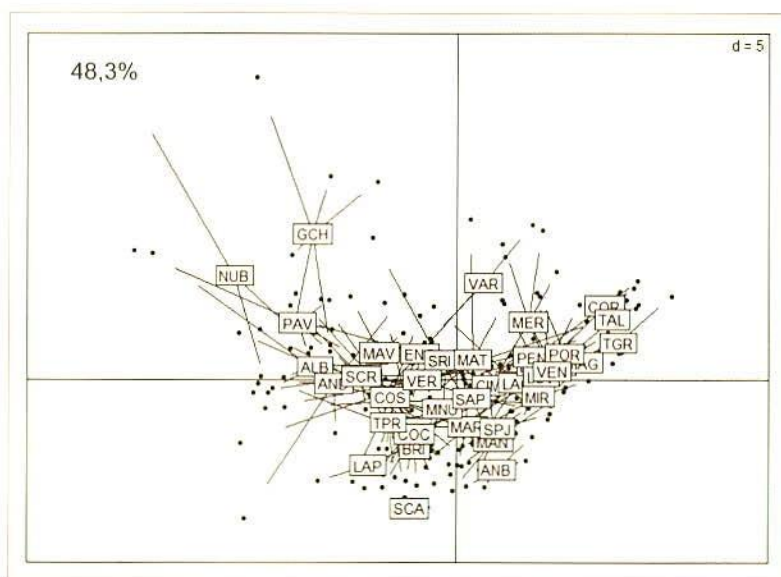
El primer análisis correspondió a la generación del círculo de correlación (Figura 6), en la que claramente se marcan dos grupos que se separan, el correspondiente a pH a las dos profundidades y el aluminio que corresponde a la acidez intercambiable, también en los dos estratos muestreados en posiciones opuestas;



**Figura 6.** Posición de las variables químicas evaluadas en todos los puntos en el círculo de correlación, componentes F1 y F2.

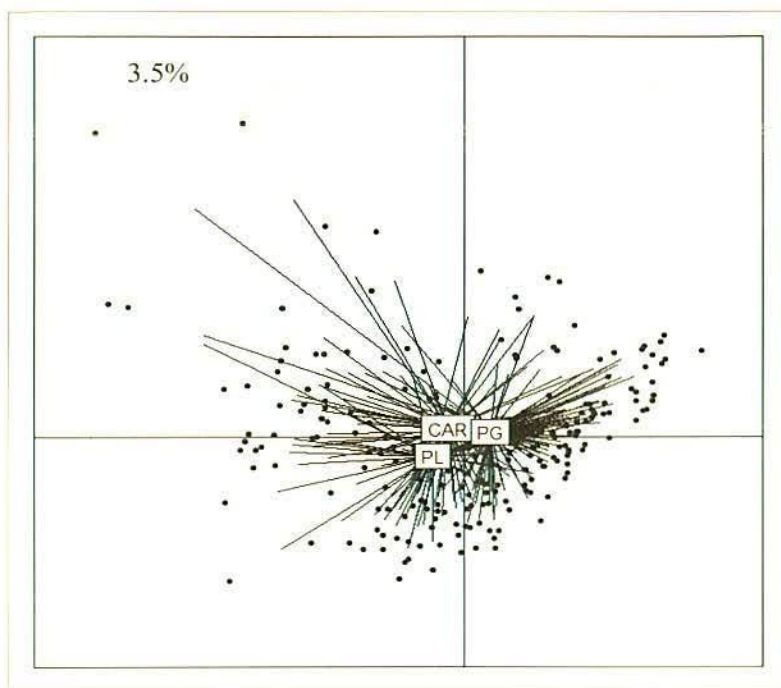
las demás variables se agrupan en un área del círculo, separándose levemente por profundidad. Esta separación indica que al incrementarse el pH en el suelo se reduce la acidez intercambiable, que para el caso de los oxisoles esta acidez es debida principalmente a la presencia de aluminio intercambiable. Igualmente se observó una relación positiva entre el pH y los contenidos de calcio y magnesio en las dos profundidades. Esta relación se debe a que durante el proceso de acondicionamiento de los suelos de la Altillanura a la producción agropecuaria, se les adiciona cal dolomítica, la cual tiene calcio y magnesio en una relación de 2:1. El componente uno explica la variabilidad de todas las muestras en un 32,3% y el componente dos en un 14,4%, para un total de 46,7%, explicando la variabilidad con el comportamiento de las variables químicas en el suelo.

Luego del correr la prueba de Montecarlo, la variabilidad entre fincas (Figura 7) fue explicada por las variables químicas del suelo en un 48,3% con  $p < 0,001$ . En el análisis se observaron algunas fincas que se separaron del conglomerado de las fincas, situación que se puede deber, probablemente, a fincas donde estos suelos han sido incorporados recientemente a actividades agropecuarias.



**Figura 7.** Ubicación de cada finca en el espacio F1 y F2 del ACP, de acuerdo con el análisis de las variables químicas registradas en cada una.

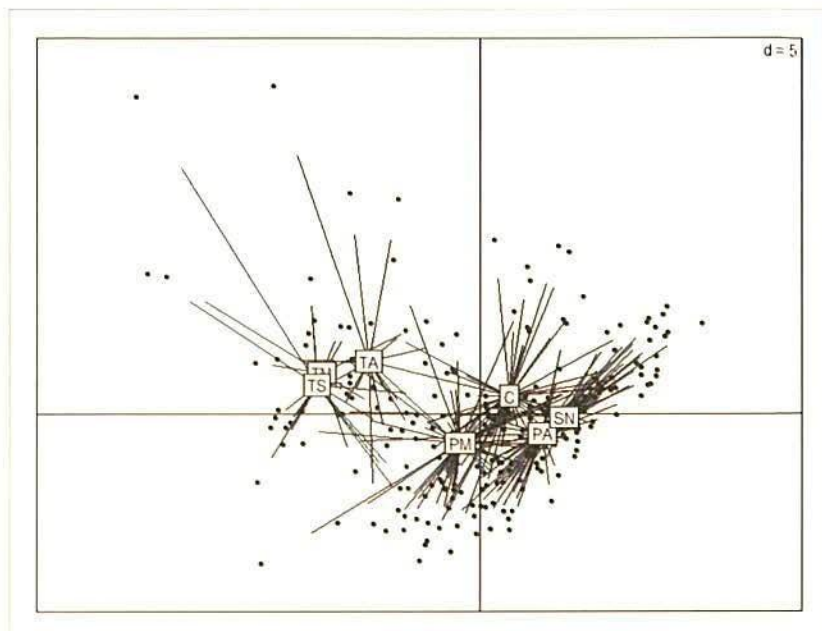
Las localidades de Puerto López, Puerto Gaitán y Carimagua presentaron una menor discriminación por las variables químicas de suelos (Figura 8), lo cual se corrobora por el valor de 3,5% ( $p < 0,001$ ) generado por la prueba de Montecarlo.



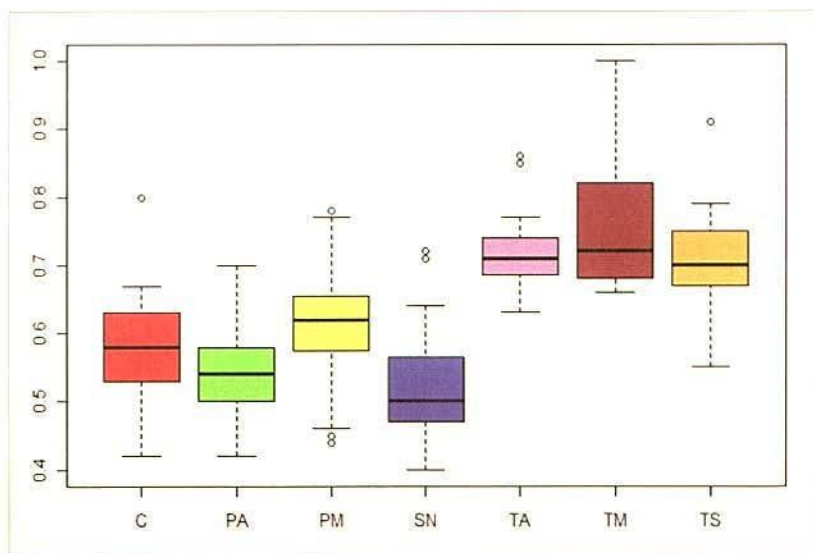
**Figura 8.** Ubicación de las localidades en el espacio F1 y F2 del ACP, debido al análisis de las variables químicas registradas en cada una.

Con respecto a los sistemas productivos (Figura 9) se encontraron cuatro agrupaciones: la primera, conformada por los cultivos transitorios; la segunda, relacionada con las pasturas mejoradas; un tercer grupo correspondiente a las plantaciones de caucho, y un grupo final conformado por las plantaciones de palma de aceite y la sabana nativa. Las variables químicas del suelo contribuyeron con un 24,1% ( $p < 0,001$ ) en la discriminación. Esto debido, probablemente, a los diferentes planes de manejo de la fertilización a la que son sometidos los diferentes sistemas de producción, además de las características iniciales del lote donde el sistema fue establecido.

Las variables químicas que más contribuyeron a la variación del componente uno fueron: el contenido de  $C_{(1,2)}$ ,  $K_{(1,2)}$ ,  $Ca_{(1)}$ ,  $Mg_{(1,2)}$ ,  $ClC_{(1,2)}$ ;  $CICE_{(1,2)}$ ,  $B_{(1,2)}$ ,  $Zn_{(1)}$ ,  $N_{(2)}$  y  $Cu_{(2)}$ , y en el componente dos se localizaron las variables  $pH_{(1,2)}$ ,  $Ca_{(2)}$  y  $Al_{(1,2)}$ . Los subíndices corresponden a las profundidades, 1 de 0 a 10 cm, y 2 de 10 a 20 cm. Siguiendo con el protocolo estadístico se generó el indicador de fertilidad química para los sistemas de producción (Figura 10). Los cultivos transitorios presentaron valores más altos del indicador con respecto a los demás sistemas, como resultado de la aplicación al suelo de fertilizantes por parte del productor; la sabana natural presentó el valor más bajo. De acuerdo con el análisis de varianza, el indicador de fertilidad química fue altamente significativo.



**Figura 9.** Proyección de los puntos de muestreo de variables químicas en los sistemas de uso sabana natural, SN; pastura mejorada, PM; transitorio maíz, TM; transitorio soja, TS; transitorio arroz, TA; caucho, C, y palma de aceite, PA, en el espacio F1 y F2 del ACP.



**Figura 10.** Indicador de fertilidad química generado en los sistemas de uso sabana natural, SN; pastura mejorada, PM; transitorio maíz, TM; transitorio soja, TS; transitorio arroz, TA; caucho, C, y palma de aceite, PA, de la Altillanura plana del departamento del Meta. 2011.

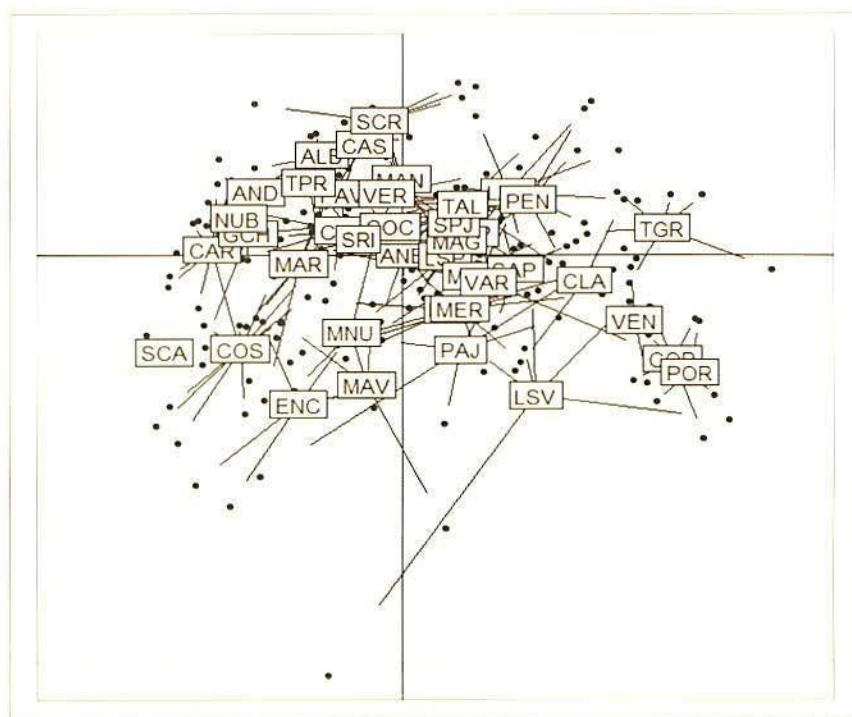


42,23%, y el componente F2, en un 20,32%, para un total de 62,55%, explicando la variabilidad debida al comportamiento de las variables físicas. Se observó la estrecha relación existente entre el contenido de agua disponible en el suelo en las profundidades de 0-10 cm y de 10-20cm con el contenido de mesoporos.

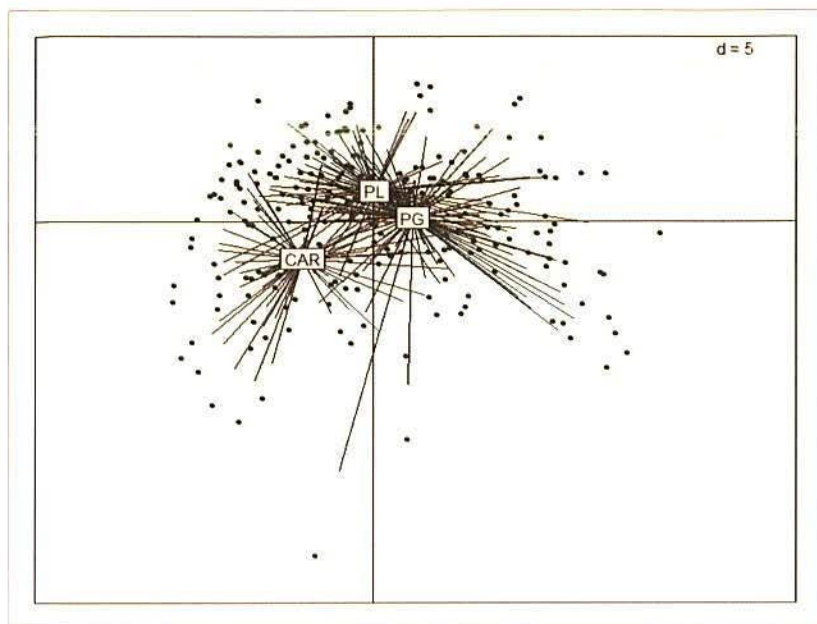
Por otro lado, se observó una relación negativa entre el contenido de agua disponible con la densidad aparente y los valores de microporosidad presentes en el suelo; un incremento en la microporosidad ocasionó una disminución en los contenidos de agua disponible.

Las variables físicas permitieron realizar una discriminación entre las fincas (Figura 12), localidades (Figura 13) y sistemas de producción (Figura 14). Luego de realizar la prueba de Montecarlo para fincas, localidades y sistemas, la explicación de la variabilidad debida a las características físicas determinadas fue del 62,9% ( $p < 0,001$ ), 11,1% ( $p < 0,001$ ) y 18,1% ( $p < 0,001$ ), respectivamente.

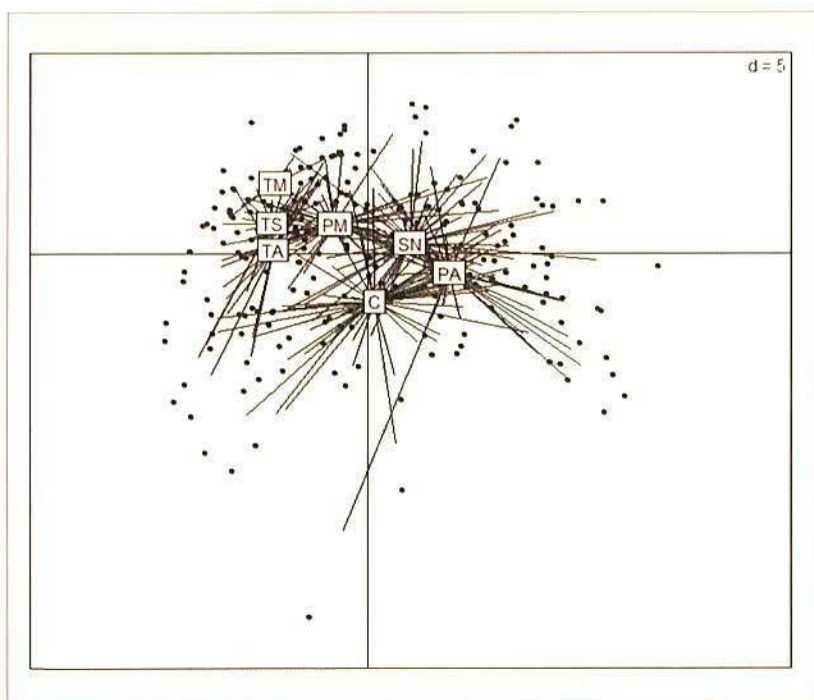
Puerto López y Puerto Gaitán, como localidades, se encuentran más cercanas entre ellas, con respecto a Carimagua. Igual que el indicador químico, las variables físicas permiten discriminar claramente los sistemas transitorios de los otros sistemas de producción. Los cultivos transitorios, debido a las



**Figura 12.** Dispersión de las fincas en función de las características físicas de los suelos.



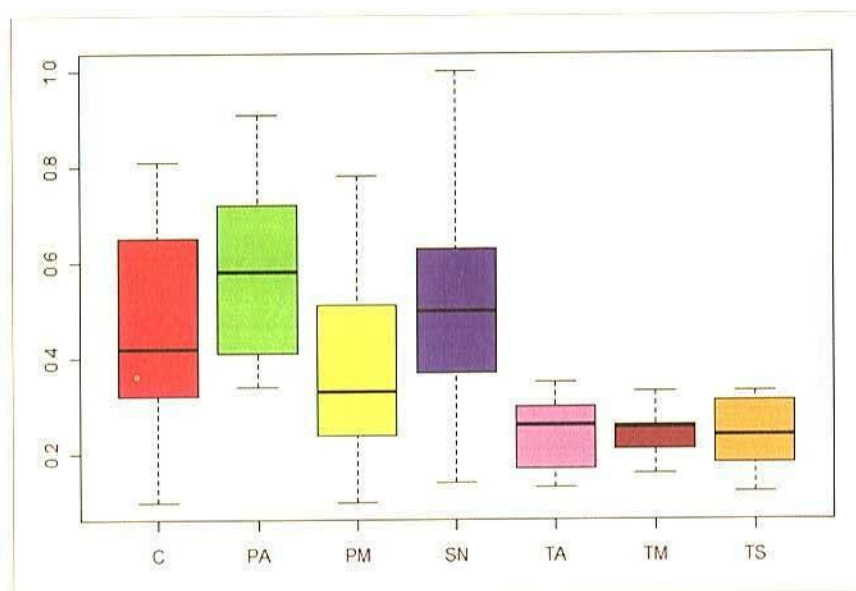
**Figura 13.** Dispersión de las localidades en función de las variables físicas evaluadas.



**Figura 14.** Dispersión de los sistemas productivos en función de las características físicas de los suelos.

prácticas de labranza y mecanización utilizadas para el acondicionamiento y preparación de los suelos para su establecimiento, generan cambios mayores en las variables físicas dinámicas del suelo, lo que ocasionó su agrupamiento diferencial con los otros sistemas.

Los sistemas transitorios presentaron los valores más bajos del indicador *funciones hídricas*, mientras que los cultivos permanentes y la sabana natural, los valores más altos (Figura 15). El análisis de varianza del indicador muestra que la diferencia entre los sistemas fue altamente significativa. Los resultados probablemente sean debidos a la reducción en la porosidad (datos no presentados), ocasionada por el continuo uso de maquinaria en los sistemas de cultivos transitorios.



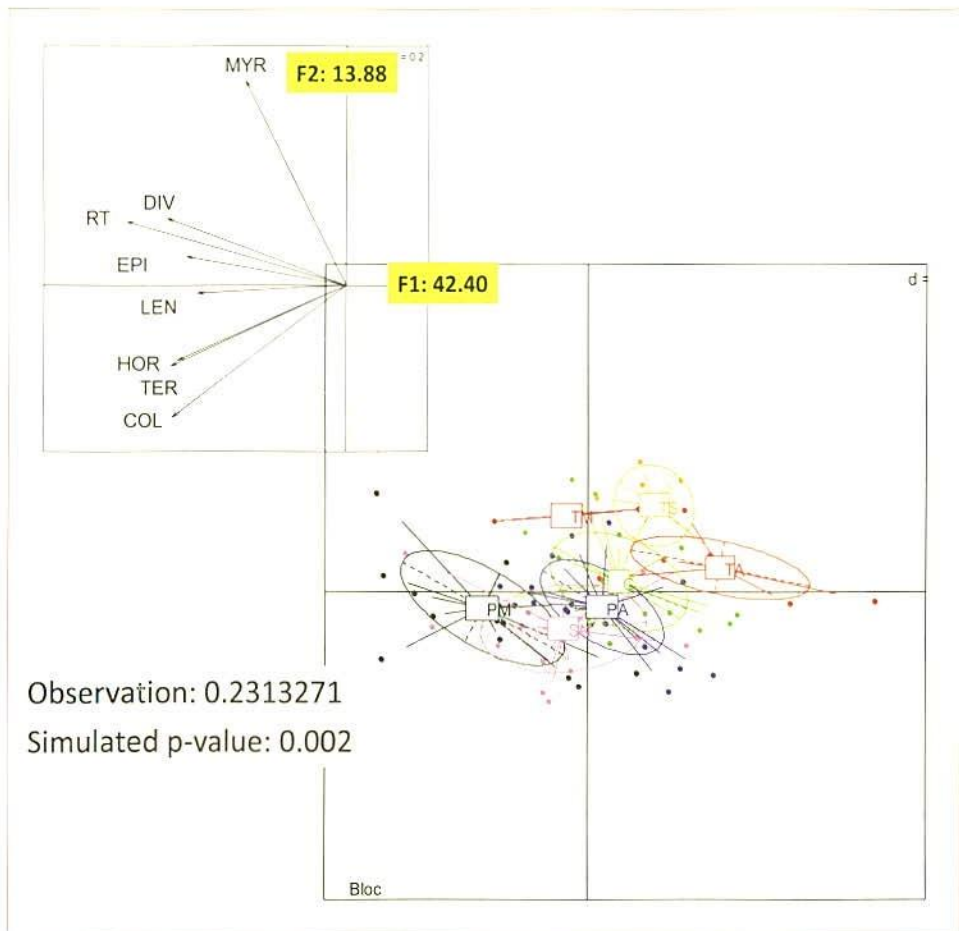
**Figura 15.** Indicador de funciones hídricas en los sistemas productivos de la Altillanura plana del departamento del Meta, 2011.

### Indicador de biodiversidad (macrofauna del suelo)

La macrofauna del suelo es un indicador muy usado (Velásquez *et al.*, 2007; Ruiz-Camacho, 2011), que refleja, por una parte, la inmensa biodiversidad endogea (microflora, micro y meso fauna) y, por otra parte, indica el posible impacto de estos transformadores de material vegetal muerto y de ingenieros del ecosistema, sobre las diferentes funciones del suelo (Lavelle y Spain, 2001). Se colectaron invertebrados de 16 órdenes, que se redujeron a siete grupos después de conformar grupos de invertebrados de funciones cercanas y con frecuencia mínima.

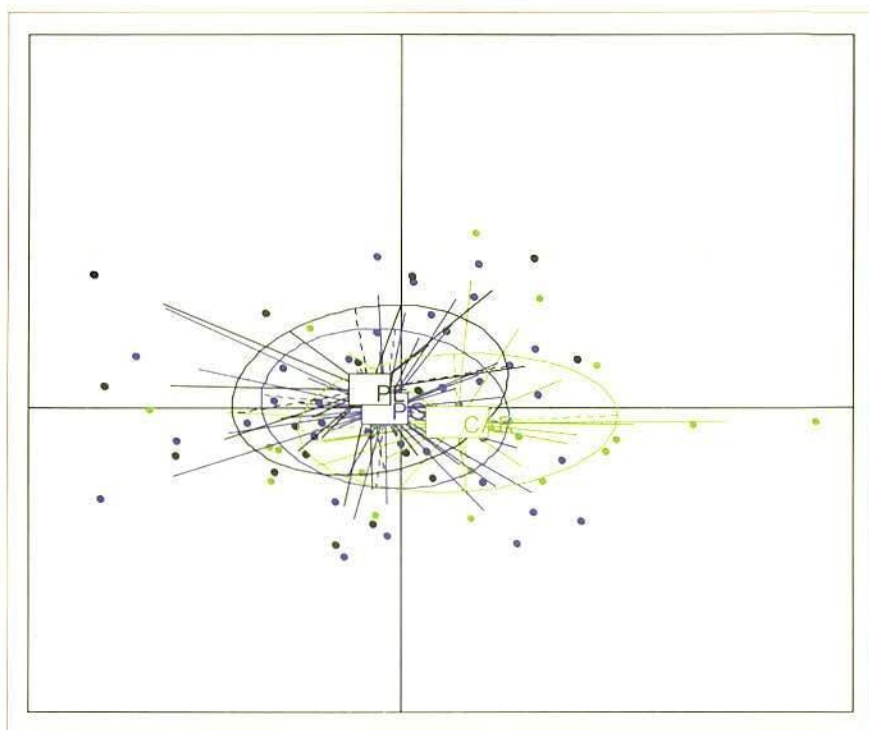
Siguiendo el mismo análisis referido anteriormente, se encontró que las comunidades del suelo respondieron de forma muy significativa a los diferentes tipos de manejo, con 34,7% de la varianza explicada y un valor de  $p < 0,002$  (Figura 16).

El efecto principal (F1, 42,4% de varianza explicada) es un gradiente muy claro de la abundancia y la diversidad de las pasturas mejoradas a sabana natural, los cultivos perennes (de palma y caucho) y los cultivos anuales. Es importante anotar que dentro de cada grupo hay una variabilidad relativamente grande, probablemente debida a la historia de los lotes y a diferencias en los tipos de manejo.



**Figura 16.** Proyección de los puntos de muestreo de los diferentes sistemas de uso en el plano factorial F1 y F2 de un ACP, de la abundancia de los diferentes grupos de macrofauna. MYR: Myriapoda; DIV: diversos invertebrados de la hojarasca; RT: riqueza taxonómica total; EPI: lombrices epigeas; LEN: lombrices endogeas; HOR: Hormigas; TER: termitas; COL: Coleóptera.

En general, las termitas fueron los individuos registrados en mayor número, seguidos por las hormigas. El análisis estadístico mostró que no había diferencias significativas entre las localidades (Figura 17).



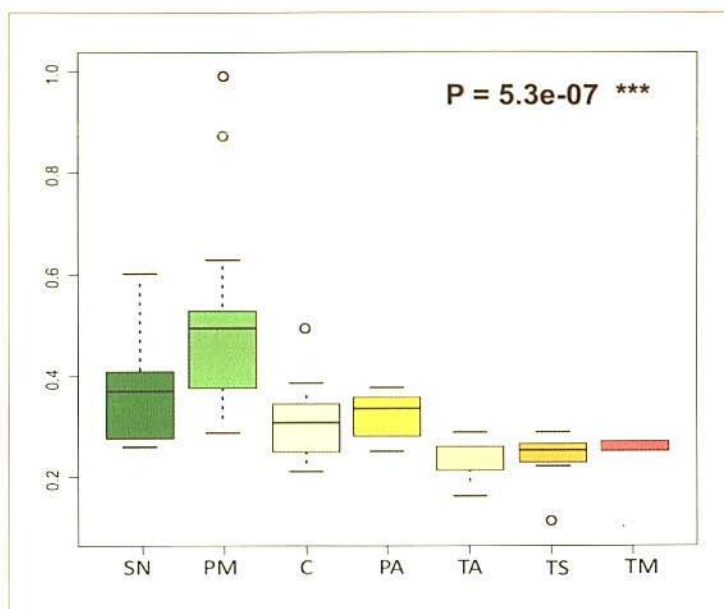
**Figura 17.** Clasificación de los puntos de muestreo, de acuerdo con el sitio de origen de las muestras (PL: Puerto Lopez; PG: Puerto Gaitán; CAR: Carimagua).

Todas las variables fueron incluidas para generar el indicador, debido a que presentaron un peso significativo en uno u otro eje.

Los valores del indicador mostraron un gradiente muy claro de abundancia y diversidad de las pasturas mejoradas a sabana natural, los cultivos perennes (palma y caucho) y los cultivos transitorios, explicando la varianza en un 34,7% y un valor de  $p < 0,002$ . Los valores más altos se obtuvieron en las pasturas mejoradas, seguidos por la sabana natural. Los cultivos perennes mantuvieron valores cercanos a los de la sabana natural, mientras que los cultivos anuales presentaron los valores más bajos (Figura 18).

### Indicador de regulación climática

Los ecosistemas participan en la regulación climática de forma positiva, por el almacenamiento de carbono en la biomasa vegetal y en el suelo, lo que tiende

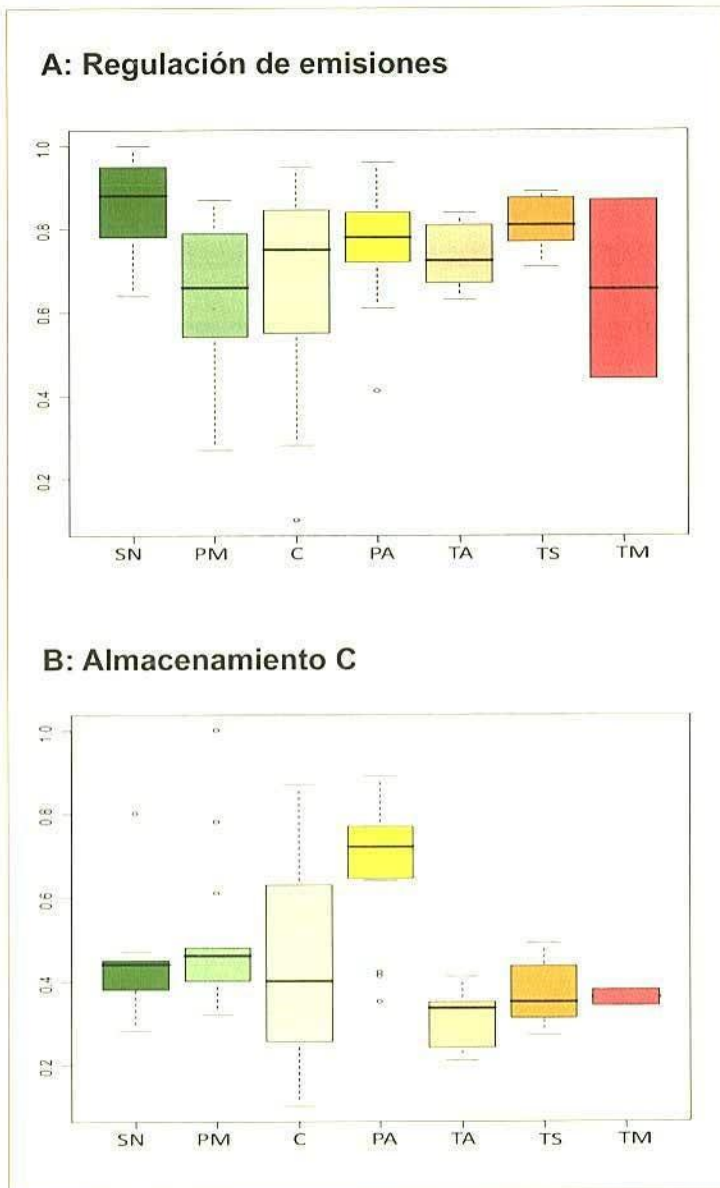


**Figura 18.** Variaciones del indicador de biodiversidad (macrofauna del suelo) entre los sistemas de uso (SN: sabana natural; PM: pastizal mejorado; C: caucho; PA: palma de aceite; TA: transitorio arroz; TS: transitorio soya, y TM: transitorio maíz.

a disminuir la carga de C en la atmósfera, y de forma negativa emitiendo gases de efecto invernadero,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{NO}_2$ . Se determinaron los contenidos de C y N en el suelo (0-20 cm), a partir de los contenidos (%) y de las respectivas densidades aparentes y de las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{NO}_2$  en cuatro meses. No se usó la metodología de los análisis multivariados, teniendo en cuenta que no era pertinente para el análisis el mezclar variables que establecen almacenamiento con aquellas que miden emisiones; se decidió, en una primera etapa, establecer un indicador de almacenamiento de C en suelos y biomasa, que es la sumatoria de los dos contenidos y un indicador de emisiones de gases de efecto de invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ). Los valores obtenidos para el control de emisiones (Figura 19A) están por encima de 0,6 para todos los usos de suelo; la sabana natural es el sistema que menos GEI emite a la atmósfera. Por otra parte, la palma de aceite es el uso del suelo que más almacena C (Figura 19B), seguido por la pradera mejorada, la sabana natural y el caucho, en su orden. Los sistemas transitorios presentaron los menores valores en términos de almacenamiento de C.

### Indicador de la estabilidad estructural del suelo

El análisis morfológico del suelo es una técnica descriptiva que permite diferenciar y cuantificar constituyentes orgánicos y minerales del suelo organizados

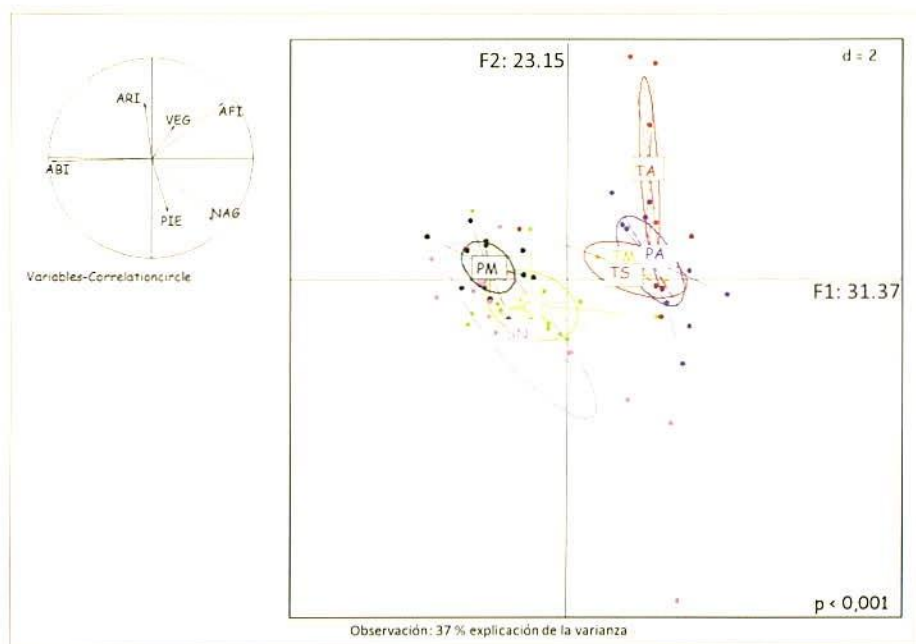


**Figura 19.** Indicadores asociados con la regulación climática.

en agregados, estructuras biogénicas particulares (macrofauna), componentes vegetales (raíces y hojarasca) y piedras. Se definen los constituyentes del suelo de acuerdo con su forma (esférica, redonda o alargada), tamaño y origen (mineral u orgánico). La actividad de la macrofauna y las diferentes bioestructuras que estos producen pueden ser cuantificadas y relacionadas por medio de esta característica (Velásquez, 2007). La morfología es considerada aquí como un in-

dicador transversal que tiene que ver con las funciones hídricas, por el papel importante que juega la agregación del suelo, pero también de regulación climática (secuestro de C en agregados estables) y resistencia a la erosión.

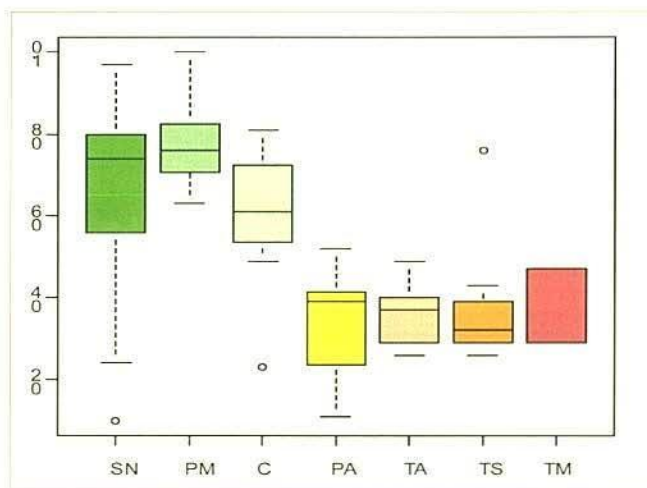
El ACP separó de forma altamente significativa ( $p < 0,001$ ) los sistemas de uso. El componente F1 (31,37%) contiene sistemas que favorecen la agregación biológica (principalmente producto de la actividad de las lombrices de tierra), a los que tienen una dominancia de la agregación física y mucho suelo sin agregar. El componente 2-F2 (23,15%) opone los sistemas con mucho suelo sin agregar a suelos con agregación física o ligada a las actividades de las raíces (Figura 20).



**Figura 20.** Círculo de correlación de las variables asociadas con la estabilidad estructural del suelo: vegetación (VEG), suelo no agregado (NAG), piedras (PIE), agregados físicos (AFI), agregados de raíz (ARI), biogénicos (ABI) y su comportamiento en los diferentes sistemas de uso evaluados.

Se observa una clara distribución de los sistemas a lo largo del eje uno, separando el grupo formado por la sabana natural, las pasturas mejoradas y las plantaciones de caucho del grupo formado por los cultivos anuales y los cultivos de palma.

Con base en la participación de las variables en los ejes, se diseñó la fórmula del indicador, la cual mostró los valores más altos en sabana natural, pastura mejorada y caucho (Figura 21).



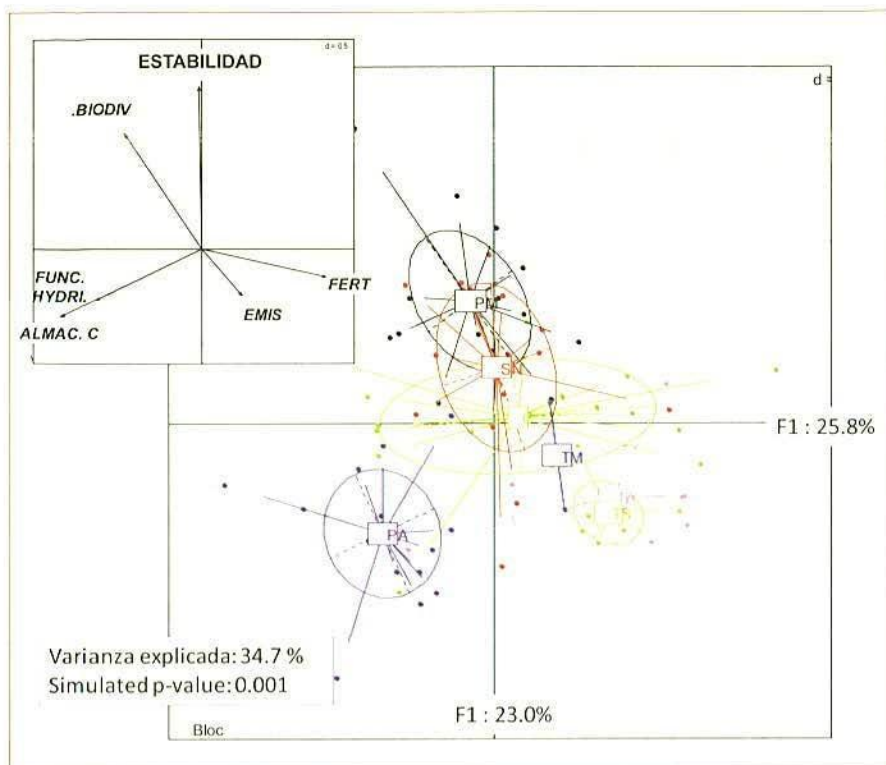
**Figura 21.** Variación del indicador Estabilidad estructural del suelo entre los sistemas de uso.

### Comparación general de los servicios ecosistémicos en los diferentes sistemas de uso

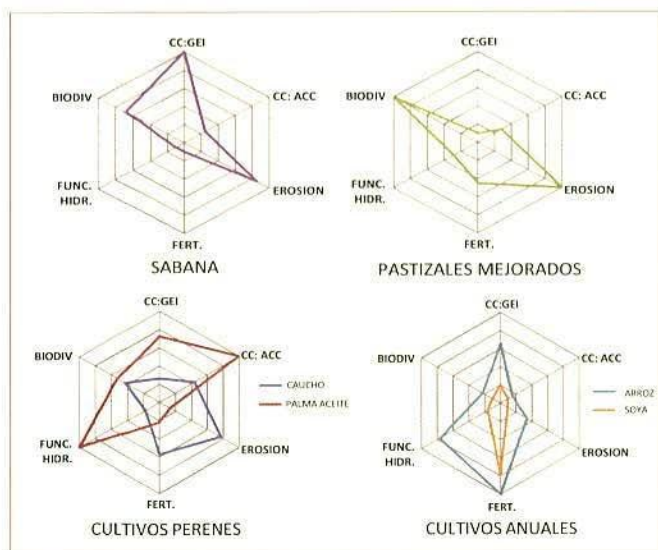
Se construyó una tabla con los valores de los seis indicadores (fertilidad química, funciones hídricas, estabilidad estructural del suelo, biodiversidad [macro-invertebrados], regulación de emisiones, almacenamiento de carbono y regulación climática).

Los sistemas de producción se separaron nuevamente de forma muy clara ( $p < 0,001$ ) (Figura 22). Mientras que las pasturas mejoradas tienen más agregados biogénicos que la sabana natural con más macrofauna del suelo, las plantaciones de palma mejoran el almacenamiento de C y las funciones hídricas. Los cultivos anuales, en general, son sistemas con mayor impacto sobre las funciones ecosistémicas, con excepción de la fertilidad química mantenida por la práctica de fertilización y el encalamiento. Los cultivos de arroz muestreados presentaron un índice de emisiones y condiciones físicas relativamente favorables. Un análisis más detallado del diagnóstico de cada lote permitirá indagar cuáles condiciones particulares explican estos resultados.

La conclusión a resaltar de este análisis es que cada sistema (Figura 23) tiene la capacidad de mejorar, por lo menos, uno de los servicios ecosistémicos medidos, mientras que otros servicios se quedan con valores muy bajos, mostrando una degradación muy rápida de las funciones asociadas. Esta observación sugiere la necesidad de diseñar arreglos que contribuyan a la creación de sinergias entre los diferentes sistemas de uso, con una distribución en el espacio (composición del mosaico de ocupación predial) y en el tiempo (rotaciones) que permita



**Figura 22.** Proyección de las variables (a) y de los puntos de muestreo agrupados en sus respectivos sistemas. (b) FERT: fertilidad química; EMIS: emisiones de gases de efecto invernadero; ALMA. C: almacenamiento de carbono en suelos y biomasa; FUNC. HYDR.: funciones hídricas; BIODIV: comunidades de macrofauna del suelo; PM: pastizal mejorado; SN: sabana natural; C: caucho; PA: palma de aceite; TM: maíz; TA: arroz, y TS: soya.



**Figura 23.** Valores comparados de los seis subindicadores ambientales en los cuatro principales tipos de uso del suelo.

mantener la producción de servicios ambientales a niveles adecuados, evitando así la degradación del capital natural representado por estos suelos.

### Indicador socioeconómico

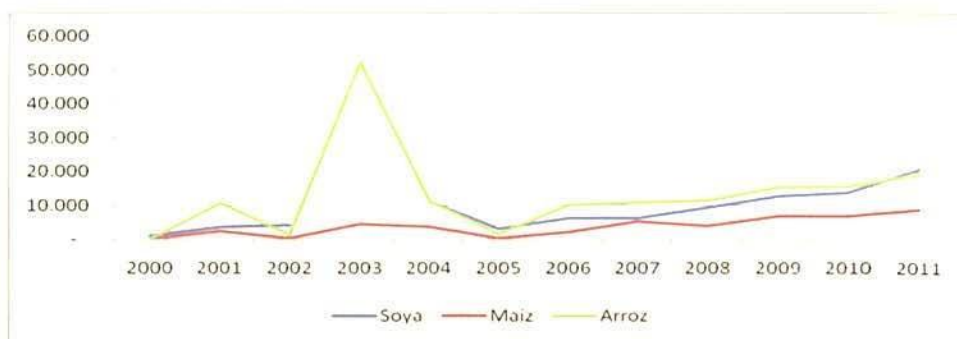
Se obtuvo respuesta de 25 sistemas productivos (seis de pradera mejorada, seis de caucho, dos de soya, uno de arroz, cuatro de palma de aceite y seis de sabana nativa). Sin embargo, la información obtenida en la totalidad de las encuestas es incompleta, teniendo en cuenta que lo referente a costos de producción, datos de rendimiento, jornales utilizados, empleos generados y producción, no siempre es manejado por los administradores o encargados y no están autorizados para aportar esta información.

La desagregación de los costos de producción se fundamenta en la información de fuente secundaria disponible y en la verificación con investigadores y expertos de la zona. Esto puede constituir una debilidad en términos de cubrimiento y representatividad para aportar la información suficiente para analizar estadísticamente y construir tanto el indicador social como el económico.

### Cultivos transitorios

#### Maíz y soya

Estas dos especies se cultivan principalmente para la producción de materia prima para la elaboración de alimentos balanceados. En la última década, las áreas de siembra de los cultivos transitorios (Figura 24) han presentado incrementos, alcanzándose entre Puerto López y Puerto Gaitán, en 2011, 20.838 ha en soya, 8.796 ha en maíz, en su totalidad cultivado de manera tecnificada, y 19.194 ha en arroz.



**Figura 24.** Evolución del área de siembra de cultivos transitorios. Puerto Gaitán - Puerto López. 2000-2011. *Fuente:* Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural del Meta.

La incorporación de los suelos “naturales” o de sabana nativa de la Altillanura a actividades agropecuarias intensivas, se hace a partir de la aplicación de

tecnologías relacionadas con la adecuación y mejoramiento de las condiciones del suelo, específicamente la preparación mecánica de los suelos, y la aplicación de correctivos y enmiendas, que alcanzan a representar un porcentaje considerable en la estructura de los costos de producción (Tablas 3 y 4).

**Tabla 3.** Costos de producción del cultivo de soya, en sabana nativa y mejorada, organizados por grandes componentes. 2011

Ítem	Soya en sabana nativa		Soya en sabana mejorada	
	Costos (\$)	Participación (%)	Costos (\$)	Participación (%)
Preparación del terreno	566.500,00	16	0,00	0
Enmiendas y correctivos	1.185.000,00	34	0,00	0
Siembra y establecimiento	371.900,00	11	452.200,00	24
Nutrición	677.500,00	20	553.000,00	29
Manejo de plagas y enfermedades	370.200,00	11	362.700,00	19
Manejo de malezas	0,00	0	203.000,00	11
Cosecha y poscosecha	185.000,00	5	185.000,00	10
Transporte	112.500,00	3	121.500,00	6
Total	3.468.600,00	100	1.877.400,00	100

**Tabla 4.** Costos de producción del cultivo de maíz, en sabana nativa y mejorada, organizados por grandes componentes. 2011

Ítem	Maíz en sabana nativa		Maíz en sabana mejorada	
	Costos (\$)	Participación (%)	Costos (\$)	Participación (%)
Preparación del terreno	516.500,00	14	0,00	0
Enmiendas y correctivos	1.185.000,00	32	0,00	0
Siembra y establecimiento	526.700,00	14	556.700,00	24
Nutrición	1.017.500,00	27	877.000,00	38
Manejo de plagas y enfermedades	128.800,00	3	199.300,00	9
Manejo de malezas	0,00	0	236.000,00	10
Cosecha y poscosecha	185.000,00	5	185.000,00	8
Transporte	180.000,00	5	270.000,00	12
Total	3.739.500,00	100	2.324.000,00	100

Con base en la estructura de costos presentada, puede deducirse que una estrategia a seguir para la reducción de los costos de producción y contribuir al incremento de la competitividad de los cultivos maíz y soya se debe concentrar en el manejo de los insumos, en los ítem de enmiendas y correctivos, siembra, nutrición y manejo fitosanitario. Acción que debe complementarse a través de la búsqueda del incremento en los rendimientos de los cultivos.

Como estrategia de rotación de cultivos transitorios se recomienda iniciar con el cultivo del arroz, para continuar con la soya y volver a una gramínea, como es el caso del maíz. Sin embargo, los productores establecen sus prioridades y de acuerdo con sus recursos y expectativas manejan sus arreglos rotacionales.

El rendimiento promedio del cultivo de la soya en la región, cuando se siembra en sabana nativa, es de 2,5 t ha<sup>-1</sup>, y cuando se siembra en sabana mejorada

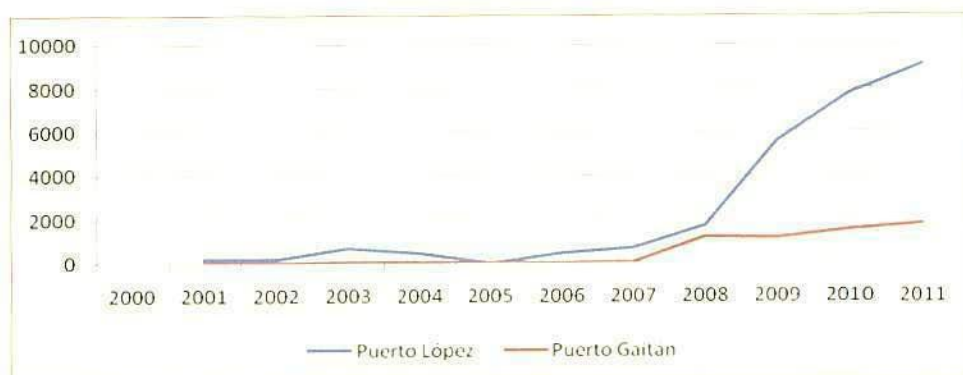
se encuentran entre los 2,7 y 3,0 t ha<sup>-1</sup>. En maíz, cuando se siembra en sabana nativa, el rendimiento promedio es de 4 t ha<sup>-1</sup>, y cuando se establece en sabana mejorada puede llegar a las 6 t ha<sup>-1</sup>.

Con respecto a la utilización de jornales para el establecimiento y el manejo de estos sistemas productivos transitorios, de acuerdo con la estructura de costos de producción se tiene que tanto el maíz como la soya, cuando se establecen por primera vez sobre sabana nativa, utilizan un mayor número de jornales que cuando se establecen en sabana mejorada. El maíz, en sabana mejorada, utiliza 4,5 jornales, y en sabana nativa, 6,9, mientras que la soya en sabana mejorada puede utilizar 5 jornales, y en sabana nativa, 7,4 jornales.

### Cultivos permanentes

#### Caucho

De acuerdo con los resultados preliminares del censo cauchero, las proyecciones para el 2010, en Puerto López, indican que habrían sembradas 7.778 ha, mientras que en Puerto Gaitán, 1.486 ha, constituyéndose Puerto López en el municipio con mayor área sembrada en caucho (Figura 25).



**Figura 25.** Evolución del área de siembra del caucho, Puerto Gaitán - Puerto López. 2000-2011. Fuente: Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural del Meta.

Este es un cultivo que durante los últimos tiempos ha formado parte de los programas de fomento del Estado y a pesar de ser establecido por productores pequeños, bajo estructuras organizativas, las grandes áreas están en manos de inversionistas y empresarios con acceso y mayor disponibilidad de recursos y tecnologías. Este es un sistema altamente utilizador de mano de obra, razón por la cual en la región se han generado dinámicas de arribo de comunidades en busca de nuevas fuentes de ingresos.

De acuerdo con los ejercicios realizados para el análisis de la estructura de los costos de producción, se puede indicar que para el primer año, en las fases de

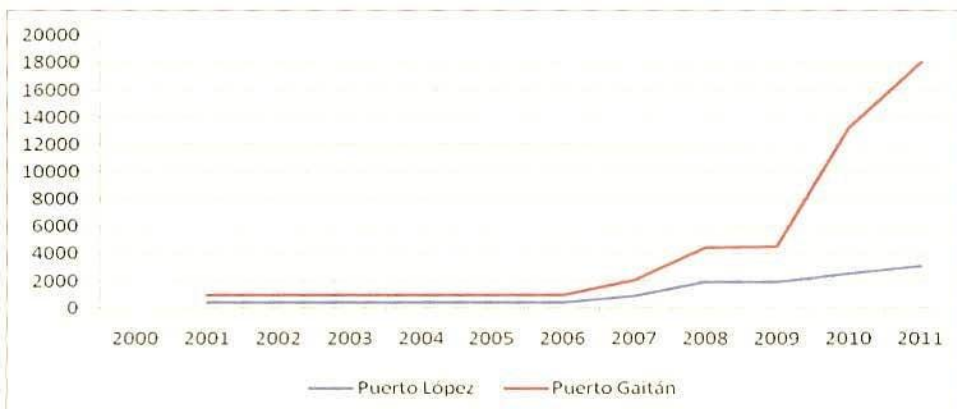
vivero, establecimiento y mantenimiento, se utiliza un total de 96 jornales, pasando a 28 jornales en los siguientes tres años, y a 12 jornales a partir del quinto año. Los componentes que mayor peso presentan en la estructura de costos de producción del cultivo del caucho son la mano de obra y los insumos (Tabla 5).

**Tabla 5.** Costos de producción del cultivo del caucho, organizados por grandes componentes. 2011

Ítem	Año 1		Año 4		Año 6	
	Costos (\$)	Participación (%)	Costos (\$)	Participación (%)	Costos (\$)	Participación (%)
Mano de obra, vivero	770.000,00	12	0,00	0	0,00	0
MO, establecimiento	1.750.000,00	27	35.000,00	2	35.000,00	2
MO, mantenimiento	840.000,00	13	945.000,00	60	385.000,00	18
Equipo de herramientas	376.100,00	6	0,00	0	0,00	0
Insumos	2.623.750,00	41	535.500,00	34	942.000,00	44
Transporte	102.025,00	2	70.000,00	4	45.000,00	2
Recolección					737.500,00	34
Total	6.461.875,00	100	1.585.500,00	100	2.144.500,00	100

### Palma de aceite

Pese a que los estudios indican que la región de la Altillanura no es apta para la palma de aceite, el incremento de las áreas sembradas durante la última década en los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán ha sido liderado principalmente por inversionistas y empresarios (Figura 26).



**Figura 26.** Evolución del área de siembra de palma de aceite. Puerto Gaitán - Puerto López. 2000-2011. *Fuente:* Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural del Meta.

La información referente a costos de producción y rendimientos del cultivo de la palma de aceite en los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán no se encuentra disponible, y en la medida en que se generen recomendaciones tecnológicas específicas para su establecimiento y desarrollo, se establecerán criterios para la estructuración de los costos de producción regionales.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diagnóstico detallado efectuado en 75 lotes de 41 fincas de la región de la Altillanura plana del departamento del Meta ha permitido caracterizar, en una primera aproximación, a cada uno de los cuatro sistemas de uso analizados con respecto a la sabana natural.

Se separaron seis indicadores que muestran variaciones entre las parcelas y los sistemas de uso, constituyendo una herramienta de valor para diagnósticos futuros. Se encontró que cada sistema de uso tiene la capacidad de mejorar, por lo menos, uno de los servicios ecosistémicos medidos, presentando la opción de organizar mosaicos de elementos complementarios en el espacio de las fincas y en rotaciones temporales.

Cada uno de los indicadores generados separó los sistemas de uso de forma altamente significativa; mientras que la pastura mejorada incrementa la biodiversidad de la macrofauna edáfica y la agregación del suelo, la palma de aceite favorece las funciones hídricas del suelo y el almacenamiento de carbono (C), y los cultivos anuales mejoran la calidad química del suelo.

El modo de cálculo de la fórmula, con base en las variables más influyentes y eliminando las variables redundantes, permite proponer un protocolo de análisis mucho más ligero para futuros trabajos, lo que disminuirá considerablemente el tiempo dedicado y el costo de los diagnósticos.

La determinación de los componentes del indicador que mida el desempeño, tanto social como económico, de los sistemas productivos analizados en la región de la Altillanura afectará directamente los resultados del indicador sintético global de ecoeficiencia; por tal razón, la información hasta el momento recopilada no contribuye a la construcción de un indicador cuantitativo sintético, pues no incluye la multidimensionalidad propia del bienestar social y económico que podría estar generándose a partir del desarrollo de los sistemas productivos analizados.

El protocolo propuesto para continuar con la construcción del indicador sintético para evaluar ecoeficiencia en la Altillanura debe cumplir, además de un proceso de ajuste y validación, una consolidación de los criterios para definir repeticiones y la adaptación a condiciones locales de algunos detalles metodológicos, como por ejemplo, el cálculo de la acumulación de biomasa para contabilizar el almacenamiento de carbono vía medidas alométricas, utilizando modelos desarrollados específicamente para las especies en Colombia.

El proceso de ajuste y validación de los indicadores obtenidos hasta el momento debe involucrar la evaluación de su estabilidad tanto espacial como temporal, manteniendo la medición en los puntos actuales e involucrando nuevos puntos en otros sistemas productivos, que en función del área de expansión identificada en el mapa de usos y coberturas, escala 1:25.000, cobran importancia. Una vez cumplida esta etapa es que se podrá iniciar el proceso de consolidación del indicador sintético global de ecoeficiencia.

Para la determinación de los componentes del indicador que mide el desempeño tanto social como económico de los sistemas productivos, se requiere consolidar la confianza de los agricultores y el ajuste de las metodologías que integren criterios condicionados por la disponibilidad estadística de cada sitio o parcela analizada, considerando que la calidad de la información obtenida afectará directamente los resultados del indicador sintético global de ecoeficiencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, J.M. & Ingram J.S.I. (1993). *Tropical Soil Biology and Fertility: An Handbook of Methods*. Second edition. CAB International. Wallingford, UK.
- Castaña, E. y Moreno, H. (1994). Cuantificación de variables cualitativas y análisis de componentes principales. En: *Memorias del simposio de estadística. Análisis multivariado de datos*. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Matemáticas y Estadística. Bogotá, Colombia.
- Chu, H.; Hosen, Y. & Yagi, K. (2007). NO, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Fluxes in Winter barley Field of Japanese Andisol as Affected by N Fertilizer Management. En: *Soil Biology & Biochemistry*, 39. Pp. 330-339.
- Conen, F. & Smith, A. (1998). A Re-examination of Closed Flux Chamber Methods for the Measurement of Trace Gas Emissions From Soils to the Atmosphere. En: *European Journal of Soil Science*, 49. Pp. 701-707.
- Frangi, J.L. & Lugo, A.E. (1985). Ecosystem Dynamics of an Subtropical Floodplain Forest. En: *Ecological Monographs*, 55. Pp. 351-369.
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007: *Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. & Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC. Ginebra, Suiza. 104 p.
- MacDicken, K.G. (1997). *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Winrock International Institute for Agricultural Development.
- Rondón, M. (2001). Effects of Land Use Change in the Llanos of Colombia on Fluxes of Methane and Nitrous Oxide, and on Radiative Forcing of the Atmosphere. Case study assessment of integrated GWP for key tropical agroecosystems. In: *Confronting Global Climate Change*. Annual Report CIAT.
- Ruiz, N.; Lavelle, P. & Jiménez, J.J. (2008). *Soil Macrofauna Field Manual*. FAO. 101 p. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0211e/i0211e.pdf>
- Snowdon, P.; Raison, J.; Keith, H.; Ritson, P.; Grierson, P.; Adams, M.; Montagu, K.; Bl, H.; Burrows, W. & Eamus, D. (2002). Protocol for Sampling Tree and Stand Biomass. En: *Technical report*, No. 31. The Australian Greenhouse Office. Australia. 66 p.
- Velásquez, E.; Lavelle, P. & Andrade, M. (2007). GISQ, an Multifunctional Indicator of Soil Quality. En: *Soil Biology and Biochemistry*, 39 (12). Pp. 3066-3080.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimientos al MADR por financiar el proyecto *Indicadores de eficiencia en el uso de los recursos biofísicos, socioeconómicos y ambientales (Ecoeficiencia) de sistemas productivos de la Altillanura plana orinocense*, convenio 072 Corpoica-CIAT, 2011.

---

### ***In memoriam***

*“Lo que hoy somos descansa en lo que ayer pensamos y nuestros actuales pensamientos forjan nuestra vida futura”.*

Siddhartha Gautama

Los autores queremos reconocer la motivación y el apoyo que **Jaime José Triana Restrepo** (q.e.p.d.), director del Centro de Investigación La Libertad de Corpoica, nos brindó para llevar a cabo este trabajo. Reconocemos la responsabilidad que nos corresponde pensando el hoy para forjar el futuro ecoeficiente de esta región considerada la última frontera agrícola del país.

---