



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Indicadores de Ecoeficiencia de Sistemas Productivos Agrícolas de la Altiplanura Plana en la Orinoquia Colombiana

Edgar Alfonso Rodríguez Araujo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Doctorado en Ciencias Agrarias
Palmira, Colombia

2018

Indicadores de Ecoeficiencia de Sistemas Productivos Agrícolas de la Altiplanura Plana en la Orinoquia Colombiana

Edgar Alfonso Rodríguez Araujo

Trabajo de tesis presentado como requisito parcial para optar al título de:

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Directora:

Ph. D. Elena Velásquez Ibáñez

Codirector:

Ph. D. Patrick Lavelle

Línea de Investigación Manejo de Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Doctorado en Ciencias Agrarias
Palmira, Colombia
2018

Dedicatoria

- A Dios por haberme concedido la dicha de haber culminado con éxitos mis estudios doctorales; una etapa importante en mi vida llena de alegrías, satisfacciones y en algunas ocasiones tristezas, que me permitieron conocerme como persona y formarme como profesional.
- A mis padres Edgar Rodríguez Magdaniel y Luz Marina Araujo Bolaños personas a las que profeso mis más sinceras admiraciones, respeto y cariño, y les debo todo lo que soy, gracias por brindarme su apoyo incondicional, confianza y amor.
- A mis hermanos Indira Rodríguez Araujo, Deisy Rodríguez Araujo y José Luis Rodríguez Araujo, al igual que mi sobrina Laura Sofia Badillo Rodríguez a quienes guardo un gran aprecio y siempre doy gracias al todo poderoso por habérmelos regalado.
- A mi bella esposa Celia Pimienta Rueda por su paciencia, apoyo constante, dedicación y profundo amor, por haberme regalado a mis dos hermosas hijas Annie Lorena Rodríguez Pimienta y la pequeña Melannie Sofia Rodríguez Pimienta de quienes espero ser su apoyo constante y ejemplo a seguir.
- A mis familiares especialmente Ana Magdaniel, Odalin Choles (Q.E.P.D), Olver Choles, Osiris Choles, Marlen Ruiz y padrinos.
- A mis maestros por su dedicación, enseñanzas y experiencia.

Agradecimientos

- Expreso de corazón mis más sinceros agradecimientos a las siguientes personas e instituciones que colaboraron de una u otra forma para que la presente investigación llegara a feliz término.
- Al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), al programa de suelos con el proyecto que buscaba “Desarrollar y validar tecnologías para el mejoramiento de la productividad y la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios de la Altillanura plana de la Orinoquia Colombiana” convenio tripartito entre el MADR, CORPOICA y CIAT quien me permitió desarrollar el trabajo para optar al título de doctorado.
- A la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, por la formación recibida.
- A la Dra. Elena Velásquez Ibáñez por su invaluable y constante apoyo durante todo el proceso.
- Al Dr. Patrick Lavelle quien confió en mí y me dio la oportunidad de participar en este proyecto.
- A la Dra. Mariela Rivera por sus valiosos aportes a este estudio.
- Al Dr. Steve Fonte por sus recomendaciones y valiosos aportes a este estudio.
- Al Dr. Juan Carlos Menjivar por su apoyo, confianza y valiosos aportes a este estudio.
- Al equipo de trabajo de CIAT: Miguel Caicedo, Gonzalo Borrero, Jesús Galvis, Arvey Álvarez, Yamileth Chagüezá, Carolina Quintero, Catalina Sanabria, Paula Chaparro,

Sandra Loaiza, María del Pilar Hurtado, Neuza Asakawa, Aracelys Castro, Jenny Burbano, Octavio Mosquera, Jaumer Ricaurte, Idelfonso Melo, Hernán Mina, por su cooperación y apoyo en el trabajo de campo.

- Al personal de CORPOICA: Cesar Botero, Nubia Rodríguez, Xiomara Pulido, Albert Gutiérrez, Jaime Bernal, Mercedes Castañeda, Jaime Castiblanco por su cooperación.
- Al interés de los profesores Edgar Madero, Carlos Escobar Ch., Harold Tafur, Carmen R. Bonilla, Álvaro García, Diosdado Baena, Mario García y Yolanda Rubiano.
- Al personal de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira: Marzory Andrade, Gloria Lasso, Ana Milena, Caliche y demás administrativos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias por su constante colaboración.

Resumen

El desarrollo agrícola de la altillanura Colombiana llevado a cabo con apoyo del gobierno es una meta ambiciosa por múltiples razones, empezando con la infertilidad intrínseca de los suelos que ha limitado el desarrollo agrícola hasta la fecha. Es importante diseñar un modelo de desarrollo agrícola que sea ecoeficiente, es decir rentable del punto de vista económico, equitativo del punto de vista social y sostenible del punto de vista ambiental. En este estudio, se diseñaron indicadores para evaluar y monitorear la ecoeficiencia de los cuatro sistemas de producción más usados por los productores que invirtieron en el área: cultivos transitorios, cultivos perenes (palma africana y hevea) y pastizales mejorados y se les comparo con la sabana natural, como sistema de referencia.

El objetivo del estudio fue la construcción de indicadores de ecoeficiencia en los sistemas de producción: cultivos transitorios (soya, maíz, y arroz), cultivos permanentes (caucho y palma de aceite), pasturas mejoradas y la sabana natural, a partir de la generación de subindicadores sintéticos con valores entre 0.10 y 1.00, asociados a los grupos de variables de regulación hídrica, fertilidad química de suelo, biodiversidad (macrofauna), regulación climática (gases efecto invernadero y almacenamiento de carbono) y de variables el componente socioeconómico.

El indicador de ecoeficiencia es la suma de un indicador de servicios ecosistemicos, de desarrollo social y de eficiencia económica. El estudio socioeconómico se hizo en 120 fincas que representan la diversidad de situaciones encontradas en el área. Análisis iniciales de la base de datos inicial de 227 preguntas organizadas en 13 bloques establecida por el CIAT, se extrajeron 5 variables representativas del entorno social (edad, tenencia de la tierra, trabajadores permanentes hombre y/o mujeres, capacitación recibida) y se usaron para diseñar un indicador de Capital Humano. Otro grupo de 11 variables se usó para describir el entorno económico con un indicador de sistemas de

producción. Finalmente, un grupo de 7 variables, que describen la composición de la finca en diferentes coberturas vegetales, se usó para diseñar un indicador de paisaje.

De los análisis multivariados (ACP y ACM) de cada grupo se calcularon indicadores variando de 0,1 a 1,0 siguiendo la metodología de Velásquez et al., (2007). Se hicieron también tipologías de las fincas de acuerdo a cada indicador, basadas en análisis de cluster. Se realizaron análisis de coinercias para evaluar la relación entre los juegos de variables, encontrándose una estrecha relación entre el capital humano disponible (número de trabajadores permanentes, edad y capacitación del productor), el sistema de producción, más o menos tecnificado que se usa, y la calidad del paisaje medida por la proporción de sistemas naturales, bosques y cultivos perenes presentes.

El impacto ambiental de los sistemas de uso se evaluó en 75 parcelas localizadas en 41 fincas diferentes, distribuidas en el transecto entre Puerto López, Puerto Gaitán, incluyendo CNI Carimagua. Se evaluaron los cuatro sistemas productivos pastura mejorada, cultivos transitorios y cultivos perennes (caucho y palma de aceite) con respecto a la sabana natural. A partir de un extenso diagnóstico agroecológico, se diseñaron 5 sub indicadores: fertilidad química de suelos, funciones hídricas, biodiversidad (macrofauna de suelo), regulación climática (almacenamiento de carbono, emisiones de GEI) y estabilidad estructural del suelo (macroagregación y morfología del suelo). Estos 5 sub indicadores se combinaron después para constituir un indicador de servicios ecosistémicos que mide el impacto ambiental de los sistemas de producción. Cada uno de los indicadores generados separó los sistemas de uso de forma altamente significativa. Mientras que la pastura mejorada en promedio mejora la biodiversidad de la macrofauna (0.73 ± 0.05) y la agregación (0.76 ± 0.02) del suelo limitando su erosión 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 calidad química (0.78 ± 0.03) estos sistemas de producción desmejoran las otras funciones, aunque de formas distintas según el tipo de producción. Se observó así que cada sistema de uso tiene la capacidad de mejorar por lo menos uno de los servicios eco-sistémicos medidos, además de aumentar el indicador económico (máximo para los cultivos transitorios con

un valor de 0.91 ± 0.09) y mejorar los índices sociales (valor promedio máximo con los cultivos perenes 0.46 ± 0.28). Existe sin embargo una variabilidad grande entre los sistemas, probablemente debida a la diversidad de los paisajes creados y al valor del capital humano presente.

El componente socioeconómico presentó patrones muy interesantes así (1) La ecoeficiencia aumenta de forma regular con el capital humano, (2) La ecoeficiencia aumenta con la intensificación del uso de la tierra (indicador económico), hasta un punto de inflexión que corresponde a un valor del indicador de sistemas de producción de 0.9 y parece disminuir de forma abrupta justo después; (3) La ecoeficiencia aumenta con la intensificación del paisaje, pero disminuye fuertemente en los paisajes más intensificados.

Estos resultados muestran globalmente una gran variabilidad en los datos de ecoeficiencia. Es clara la influencia de los sistemas de cultivo implementados sobre los parámetros ambientales y el capital humano. Sin embargo, se nota una relación fuerte con el paisaje creado, con una disminución de la ecoeficiencia ya notable en las fincas que tienen menores proporciones de espacios naturales y bosques, aunque los cultivos perenes puedan ayudar a mejorar la condición ambiental hasta cierto punto.

Palabras clave: Oxisoles, Servicios ecosistémicos, Gases efecto invernadero,
Caracterización socioeconómica y Análisis multivariado

Abstract

The agricultural development of the Colombian altillanura, carried out with government support, is an ambitious goal for many reasons, starting with the intrinsic infertility of the soils that has limited the agricultural development up to now. It is important to design an ecoefficient agricultural development model, that is economically profitable, equitable from a social point of view and environmentally sustainable. In this study, indicators were designed to evaluate and monitor the eco-efficiency of the four production systems most used by the producers who invested in the area: transitional crops, perennial crops (African palm and hevea) and improved pastures compared with Natural savanna as a reference system.

The objective of the study was the construction of eco-efficiency indicators in the production systems: transitional crops (soybean, maize, and rice), permanent crops (rubber and oil palm), improved pastures and natural savanna, from generation Of synthetic sub-indicators with values between 0.10 and 1.00, associated to the groups of variables of water regulation, soil chemical fertility, biodiversity (macrofauna), climate regulation (greenhouse gases and carbon storage) and socioeconomic variables.

The eco-efficiency indicator is the sum of an indicator of ecosystem services, social development and economic efficiency. The socioeconomic study was done in 120 farms that represent the diversity of situations found in the area. Five initial variables of the social environment (age, land tenure, permanent male and/or female workers, training received) were extracted from the initial database of 227 questions organized in 13 blocks established by CIAT and were used to design a Human Capital indicator. Another group of 11 variables were used to describe the economic environment with an indicator of Production Systems. Finally, a group of 7 variables, which describe the composition of the farm in different vegetation cover, was used to design a landscape indicator.

From the multivariate analysis (PCA and ACM) of each group, indicators ranging from 0.1 to 1.0 were calculated following the methodology of Velasquez et al. (2007). Typologies of the farms were also made according to each indicator, based on clusters analysis to assist in the interpretation. Significant covariations were measured showing a close relationship between the available human capital (number of permanent workers, age and training of the producer), the production system, more or less technified, that is used, and the quality of the landscape measured by the relative proportions of natural systems, forests and perennial crops present. Ecosystem services of land use systems was evaluated in 75 plots located in 41 different farms, distributed in the transect between Puerto López, Puerto Gaitán and Carimagua.

The four production systems improved pasture, transient crops and perennial crops (rubber and oil palm) were evaluated with respect to the natural savanna. Based on an extensive agroecological diagnosis, 5 sub indicators were designed: chemical soil fertility, water functions, biodiversity (soil macrofauna), climate regulation (carbon storage, GHG emissions) and soil structural stability (macroaggregation and morphology of floor). These 5 sub indicators were added later to constitute an indicator of ecosystem services that measures the environmental impact of production systems.

Each of the indicators generated separated the systems of use in a highly significant way. While improved pasture on average improves the biodiversity of macrofauna (0.73 ± 0.05) and aggregation (0.76 ± 0.02) of the soil by limiting its erosion compared to the natural savanna, the oil palm improves the water functions of the soil and the Storage of C and annual crops improve the chemical quality (0.78 ± 0.03) these production systems deteriorate the other functions, but in different ways according to the type of production. It was observed that each system of use has the capacity to improve at least one of the measured ecosystemic services, besides increasing the economic indicator (maximum for transitory crops with a value of 0.91 ± 0.09) and to improve the social indexes (Maximum value with perennial crops 0.46 ± 0.28). There is, however, a large variability between the systems, probably due to the diversity of landscapes created and the value of present human capital.

The socio-economic component presents very interesting patterns as well (1) Eco-efficiency increases on a regular basis with human capital, (2) Eco-efficiency increases with the intensification of land use (economic indicator), to an inflection point corresponding to a Value of the indicator of production systems of 0.9 and seems to decrease abruptly just after; (3) Eco-efficiency increases with the intensification of the landscape, but decreases strongly in the intensified landscapes

These results globally show great variability in eco-efficiency data. The influence of cropping systems on environmental parameters and human capital is clear. However, there is a strong relationship with the landscape created, with a decrease in eco-efficiency already

Key words: Oxisols, Ecosystem services, Greenhouse Gases, Socioeconomic Characterization and Multivariate Analysis.

Contenido

	Pág.
1. Planteamiento del problema.....	5
2. Justificación	9
3. Hipótesis de la investigación	11
4. Objetivos.....	13
4.1 Objetivo General	13
4.2 Objetivos Específicos:	13
5. Marco Teórico y Estado del arte	15
5.1 El concepto de Ecoeficiencia.....	16
5.2 Componente económico de la ecoeficiencia.....	19
5.3 Componente social de la ecoeficiencia.....	22
5.4 Componente ambiental de la ecoeficiencia.	24
5.4.1 . Servicios ambientales.	25
5.4.2 Macrofauna del suelo y servicios ambientales.	28
5.4.3 Las lombrices de tierra.....	31
5.4.4 . La agregación, un atributo esencial para la conservación de los suelos.	32
5.5 . Ecoeficiencia del Paisaje.....	33
5.6 Indicadores: definición y evolución.	35
5.7 . Biodiversidad y bioindicadores.	39
5.7.1 La macrofauna como bioindicador.	40
5.7.2 . Indicadores de la calidad física y química de suelos.	43
5.7.3 Morfología del suelo.	43
6. Materiales y Métodos	47
6.1 Evaluación Ambiental.....	47
6.1.1 Aspectos asociados al indicador de fertilidad de suelos.....	50
6.1.2 . Aspectos asociados al indicador de función hídrica de suelos	52
6.1.3 . Aspectos asociados al indicador de Biodiversidad (macrofauna).....	54
6.1.4 . Aspectos asociados al indicador de control climático (Medición de gases efecto invernadero (GEI)).	56
6.1.5 Aspectos asociados al indicador de control climático (Determinación de carbono en biomasa aérea de los cultivos).....	61
6.2 . Aspectos asociados al indicador socioeconómico (Determinación de las condiciones socioeconómicas).....	63
6.3 Indicador de ecoeficiencia	64
6.4. Metodología Estadística.....	65

7. Resultados	69
7.1 Variables Ambientales	70
7.1.1 Variables de Fertilidad Química de suelos:.....	70
7.1.2 . Funciones Hídricas.....	74
7.1.3 . Biodiversidad (macrofauna del suelo).....	77
7.1.4 . Estabilidad estructural del suelo.	81
7.1.5 Regulación climática por los diferentes tipos de uso del suelo	84
7.2 . Variables socioeconómicas.....	88
7.3 . Análisis de Co-inercia	96
7.4 . Construcción del Indicador de Ecoeficiencia	97
8. Discusión	107
9. Conclusiones y Recomendaciones	117
9.1 Conclusiones	117
9.2 . Recomendaciones	118
10. Bibliografía	143

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Interacciones entre los organismos del suelo a diferentes escalas que permiten su participación en la producción de servicios ambientales.....	29
Figura 2. Componentes principales de la Ecoeficiencia.....	35
Figura 3. Ubicación de los sistemas bajo estudio. Departamento del Meta, municipios de Puerto López y Puerto Gaitán.	49
Figura 4. Toma de muestras para análisis químico cerca de la cámara instalada.	50
Figura 5. Toma de muestras en anillo para determinar densidad aparente.	53
Figura 6. Resistencia a la penetración en cultivo de caucho.....	53
Figura 7. Representación del procedimiento de toma de muestras en las tres profundidades.	54
Figura 8. Toma de muestra y empaque en costal rotulado	55
Figura 9. Separación de individuos y almacenamiento de muestras de macro-fauna	56
Figura 10. Cámara instalada en campo para el monitoreo de los gases efecto invernadero CO ₂ , NO ₃ y CH ₄	57
Figura 11. Puntos de medición resistencia en cultivos transitorios.	58
Figura 12. Puntos de medición cultivos permanentes.....	59
Figura 13. Almacenamiento de muestra de gas en vial al vacío	60
Figura 14. Cromatógrafo de gases utilizado para análisis de metano y óxido nitroso.	61
Figura 15. Toma de muestras de biomasa en sistemas de soya y sabana nativa.....	61
Figura 16. Medición de altura a través de un hipsómetro y DAP de tallo respectivamente.	62
Figura 17. Proyección de las variables del Subindicador de fertilidad química de suelo en los sistemas de producción basada en los dos primeros factores del ACP de 0-10 cm de profundidad (pH: potencial de hidrogeno; CA: Calcio; MG: Magnesio; S: Azufre; P: Fósforo; K: Potasio; CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva; MN: Manganeso; B: Boro; ZN: Zinc; CN: Relación Carbono Nitrogeno; CU: Cobre CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; MO: Molibdeno; N:Nitrogeno; C: Carbono; AL: Aluminio; SAT1AL: Saturación de Aluminio con CIC; SAT2AL: Saturación de Aluminio con CIC; C. Permanente: Cultivos Permanentes; C. Transitorio: Cultivos Transitorios; Sabana N.: Sabana Natural; P. Mejorada: Pasturas Mejoradas).	74
Figura 18. ACP de las variables físicas: DA: densidad aparente; HUMV: humedad volumétrica; HUM: humedad gravimétrica; DPM: diámetro ponderado medio – Estabilidad de Agregados; ADS: agua disponible – capacidad de almacenamiento de agua	

(Saturación – SAT, Capacidad de campo – CC – Punto de marchitez permanente – PMP), texturas: (Arcilla – Limo – Arena), poros: Porosidad (Macro – meso – micro)	77
Figura 19. ACP de los diferentes grupos taxonómicos de macrofauna. DIV: diversos invertebrados de la hojarasca; TR: riqueza taxonómica total; EPI: lombrices epigeas; LEN: lombrices endógeas; HOR: Hormigas; TER: termitas; COL: Coleóptera.	80
Figura 20. Composición y abundancia de la macrofauna del suelo en los diferentes sistemas de uso mostrando una disminución progresiva desde las pasturas mejoradas hacia la sabana nativa, los cultivos permanentes y los anuales. El tamaño de los círculos es proporcional a la densidad total.....	81
Figura 21. ACP de la Estabilidad estructural del suelo entre los sistemas de uso Sabana natural; Pastizal mejorado; Cultivos permanentes (caucho; palma de aceite) y Cultivos Transitorios (arroz; soya y maíz).....	84
Figura 22. Indicadores asociados a la regulación climática entre los sistemas de uso (SN: sabana natural; PM: Pastizal mejorado; C: caucho; PA: palma de Aceite; TA: Transitorio Arroz; TS: Transitorio Soya; TM: Transitorio Maíz.....	87
Figura 23. La proyección en el plano factorial delimitado por los F1 y F2, mostró condiciones contrastantes entre los sistemas con pasturas mejoradas y los cultivos transitorios. Las pasturas mejoradas presentaron mayor almacenamiento de carbono en el suelo y emisiones mayores de CH ₄ y CO ₂	88
Figura 24. ACM de las variables de capital humano (A). Clúster (B), TMP. ninguna: No emplea mano de obra femenina tiempo completo; THP.medio: Emplea mano de obra masculina tiempo completo; Edad.mayor: propietario mayor; TT.alquiler: Tenencia de la tierra en alquiler; TMP.Muchas: emplea mucha mano de obra femenina tiempo completo; CTA.no: No formación académica; CTA.otro: posee otro tipo de formación; TT.propia: Tenencia de la tierra Propia; CTA.si: Si tienen formación académica; Edad.joven: propietario joven; THP.muchos: Emplea mucha mano de obra masculina tiempo completo; THP.pocos: Emplea poca mano de obra masculina tiempo completo; TMP.pocas: Emplea poca mano de obra femenina tiempo completo Edad.adulto: propietario adulto.	91
Figura 25. ACM de las variables de Sistemas de producción (A). Clúster (B). ICER.facilcomercio: Invierte en cultivos de fácil comercio; ICER.bajoriesgo: Invierte en cultivo de bajo riesgo; LCP.maiz: lote sembrado con maíz; MCQ.químico: realiza control químico de malezas; TPC.rotacional: utiliza pastoreo rotacional; CQPE.trampas: utiliza trampas para control químico de plagas y enfermedades; CQPE.quimico: utiliza control químico de plagas y enfermedades; TLD.disco: utiliza arado de disco; TPC.alterno: utiliza pastoreo alterno; G.si: tiene ganadería establecida; AS.no: no realiza análisis químico de suelos; COR.si: corrige acidez del suelo; PS.si: prepara el suelo antes de la siembra; CQPE.otro: utiliza otro tipo de control para plagas y enfermedades; HCM.otro: realiza otro tipo de control de maleza; ICER.altarenta. Invierte en cultivos de alta rentabilidad; CQPE.biológico: utiliza control biológico para manejo de plagas y enfermedades; As.si: si realiza análisis de suelos; TLD.otro: utiliza otro tipo de labranza; HCM.si: realiza control de maleza; LCP.arroz: lote sembrado con arroz; MCQ.mecánico: realiza control mecánico de malezas; ICER.mayorvalor: Invierte en cultivos de mayor valor; LCP.soja: lote	

sembrado con soja; TLD.vertedera: utiliza arado de vertedera; TPC.otro: utiliza otro tipo de pastoreo; G.no: no tiene ganadería establecida; CQPE.cultural: utiliza control cultural para manejo de plagas y enfermedades; TPC.contino: utiliza pastoreo continuo; MCQ.otro: realiza otro tipo de control de malezas; COR.no: no corrige acidez del suelo; HCM.no: no realiza control de maleza; LCP.otro: lote con otros cultivos; TLD.cinzel: utiliza arado de cinzel; Ps.no: no prepara el suelo antes de la siembra. 93

Figura 26. ACP de las variables de Composición del paisaje (A). Clúster (B). pcCPER: paisaje con cultivos permanentes; pcCFOR: paisaje con especies forestales ó bosques; pcCTEM: paisaje con cultivos temporales o transitorios; pcPAMB: paisaje con zonas de protección ambiental; pcPAST: paisaje con pasturas mejoradas; pcSAB: paisaje con sabanas nativas. 94

Figura 27. ACP de todos los subindicadores y el Indicador de Ecoeficiencia.102

Figura 28. Valores del indicador de ecoeficiencia de los sistemas de producción en función de la cobertura vegetal y los tipos de paisaje.103

Figura 29. Ecoeficiencia reducido en función de Capital Humano (A) y en función del Sistema de producción o intensificación (B).104

Figura 30. Ecoeficiencia reducido en función de la calidad del paisaje.105

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo	44
Tabla 2. Propiedades químicas de suelo evaluadas y metodología para su determinación	51
Tabla 3. Propiedades físicas de suelo evaluadas y metodología para su determinación.	52
Tabla 4. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa en palmas y caucho. ..	63
Tabla 5. Estadística descriptiva de las variables asociadas a fertilidad de suelo en los sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y pasturas mejoradas.....	71
Tabla 6. Estadística descriptiva de las variables asociadas a la regulación hídrica socioeconómica en los sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y Pasturas mejoradas.	75
Tabla 7. Estadística descriptiva de las variables asociadas a biodiversidad de macroinvertebrados en suelos en sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y Pasturas mejoradas.	78
Tabla 8. Estadística descriptiva de las variables asociadas a estabilidad estructural en suelos en sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y pasturas mejoradas	82
Tabla 9. Estadística descriptiva de las variables asociadas a la regulación climática (almacenamiento de C en la biomasa, suelos y CO ₂) y emisiones de gases a efecto de invernadero (CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O) en suelos en sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y pasturas mejoradas	85
Tabla 10. Análisis de las variables socioeconómicas	90
Tabla 11. Valores de cada Subindicador del componente socioeconómico.	95
Tabla 12. Análisis de Coinercia entre las variables socioeconómicas.	96
Tabla 13. Contribución de los factores 1 y 2 al total de la inercia en ACP y ACM, en los grupos de variables asociadas a servicios ecosistémicos, regulación climática y la caracterización socioeconómica en los sistemas de producción.	96
Tabla 14. Valores de los Indicadores de Ecoeficiencia y Subindicadores en los sistemas productivos: Cultivos transitorios, Sabana nativa, Pasturas mejoradas y Cultivos permanentes.....	101
Tabla 15: Análisis de las variables que más contribuyen a los subindicadores y % de varianza explicada por el tipo de cobertura o de paisaje.	108

Introducción

En el año 2011 se suscribió un convenio tripartito entre el MADR, CORPOICA y CIAT, con el objetivo de “Desarrollar y validar tecnologías para el mejoramiento de la productividad y la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios de la Altillanura plana de la Orinoquia Colombiana”. Este convenio buscaba aprovechar las fortalezas de cada institución en las diferentes áreas del conocimiento, concentrándolas en intereses comunes para el desarrollo integral del sector agropecuario regional. Además de promover la conservación de los suelos el cual es un elemento clave en el desarrollo agrícola de la altillanura plana. Naturalmente pobres, compactos y ácidos, estos suelos necesitan un acondicionamiento físico y químico para permitir cultivos transitorios y otros sistemas (Amézquita, 1997). Era necesario hacer una validación de estas herramientas, confirmando su validez técnica y discutiéndolos con los productores para saber si les parecen aceptables y en qué forma les ayudan en el diseño de sus fincas y en la selección de las prácticas técnicas.

Según la Gobernación del Meta e IGAC, 2004:

La ampliación de la frontera agrícola planteada para la altillanura colombiana, es una amenaza potencial pero también una oportunidad para aumentar la producción de bienes y servicios de forma sostenible en sistemas intervenidos. 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 soportadas por la falta de conocimiento de los productores sobre la oferta ambiental; constituyen elementos que pueden conducir a la degradación de las funciones productivas y ambientales de los suelos, llevando a la inviabilidad económica de los sistemas productivos y a la

erosión de la condición social de sus pobladores, para que el desarrollo de la altillanura sea sostenible debe considerar tres elementos claves, el primero relacionado con el aspecto económico, la productividad y rentabilidad de las fincas, el segundo social, la creación de condiciones favorables para acceso a los mayores elementos del bienestar humano (educación, seguridad, salud y acceso a los recursos básicos) y el tercero ambiental, la conservación de la biodiversidad y de la capacidad de los ecosistemas agrícolas y naturales, para producir servicios ambientales.

En la actualidad, esta región natural contribuye en forma creciente a la producción de granos y materias primas de cultivos transitorios (arroz, soya, maíz) y perennes (caucho, palma, forestales y caña), además de proveer bovinos para el sistema ceba que genera el 60% de carne consumida en Bogotá y sus alrededores. Por lo tanto, el desarrollo integral de la altillanura plana de la Orinoquía Colombiana es una de las grandes prioridades del sector público y privado del país, teniendo en cuenta su gran potencial (CIAT, 2012).

El consejo mundial para el desarrollo sostenible (1992), define ecoeficiencia como un elemento fundamental para promover cambios estructurales en la forma como las sociedades producen y consumen los recursos, y por lo tanto para medir el progreso en el crecimiento verde. La ecoeficiencia fue pensada como un enfoque práctico para que el sector productivo pudiera contribuir con el desarrollo sostenible a través de la búsqueda de beneficios a largo plazo, mediante la incorporación de actividades que respeten la capacidad de carga de la tierra, considerando la sociedad y los sistemas socioeconómicos (WBCSD, 2000). Los indicadores de ecoeficiencia deben estar diseñados para capturar la eficiencia ecológica del crecimiento, mediante la medición de la eficiencia de la actividad económica en términos tanto de consumo como de producción (uso de recursos) y sus correspondientes impactos ambientales (MEA, 2005). El objetivo final de los indicadores de ecoeficiencia debe ser el de proporcionar una herramienta práctica, para medir el desempeño de los sistemas de producción, en el contexto

de la ecoeficiencia y aprovechar el concepto de ecoeficiencia para la generación de políticas relacionadas a la sostenibilidad del medio ambiente. Según WBCSD, (2000):

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 sostenibilidad) y que contribuya a la creación de oportunidades de desarrollo en zonas rurales (que sea equitativa y justa) es una agricultura considerada eco-eficiente.

Con el propósito de contribuir al análisis y a la búsqueda de soluciones a la problemática planteada anteriormente, en una primera etapa del proyecto se inició la construcción de indicadores asociados a la ecoeficiencia de cuatro sistemas productivos en relación con la sabana nativa en la altillanura plana del departamento del Meta. El proyecto se dividió en cinco capítulos repartidos de la siguiente forma: en el primer capítulo se trató el marco de referencia, el segundo capítulo presenta los materiales y métodos, el tercer capítulo aborda los resultados, el cuarto capítulo trata sobre la discusión y el quinto capítulo presentó las conclusiones, recomendaciones, terminando con la revisión bibliográfica.

1.Planteamiento del problema

Los llanos orientales de Colombia u Orinoquia Colombiana según Rippstein *et al.*, (2001):

Poseen una extensión de 17 millones de hectáreas y contienen tres sistemas de tierras o paisajes; el piedemonte, las llanuras aluviales y las altillanuras (los suelos bien drenadas y los inundables). Pertenecen a un macrosistema de importancia global (las sabanas tropicales) cuya topografía permite la mecanización agrícola y cuyos suelos exigen un manejo cuidadoso. Su población escasa comprende etnias indígenas y colonos inmigrantes. Sus suelos (Oxisoles y Ultisoles) son ácidos y poco fértiles, están sometidos a temperaturas altas durante el año y a excesos de humedad, y se caracterizan por la lixiviación de minerales y por la formación de lateritas (Gleyzación). Desde hace años, esta sabana herbácea y poco arbustiva se ha destinado a una ganadería extensiva de carga baja. Actualmente manifiestan estos suelos un alto potencial agrícola comercial y han permitido la introducción de especies forrajeras mejoradas. El subsuelo es muy rico en hidrocarburos.

Hoy en día, se espera de los suelos del planeta una gran diversidad de servicios, en cantidades cada vez más grandes (Montes, 2007; MEA, 2005; Donoso, 2005.) Mientras el crecimiento de la población humana sigue, aumenta la necesidad de producción de alimentos. De aquí al año 2050 habrá que producir 70% más que ahora. La demanda creciente de biocombustibles se adiciona creando mucha presión sobre los suelos ya cultivados o las últimas áreas de suelos naturales. Al lado de estas necesidades productivas, se espera de los suelos una producción estable o creciente de servicios

ambientales (Donoso, 2005; Lal, 2004), estas funciones del suelo que son benéficas para las actividades humanas.

También se espera que los suelos conserven su biodiversidad que resulta ser muy grande (25% de la biodiversidad total del planeta) aunque muy poco conocida (Decaëns 2010; Swift *et al.* 2004; De Ruiter, *et al.* 1998). Otras presiones vienen de la urbanización que muchas veces se desarrolla sin importar mucho la calidad del suelo. Estas reservas utilizables no se pueden ampliar mucho, más que todo porque las áreas que se podrían convertir a la agricultura son las últimas áreas naturales (10 mil hectáreas) de una “importancia estratégica para la conservación de la biodiversidad y la producción de servicios ambientales” (Díaz *et al.* 2006, Fitter *et al.* 2005; Lavelle *et al.* 2004a). Finalmente, el 30% de los suelos usados presentan señales, a veces graves, de degradación (UNEP, 2010; Bai *et al.* 2008; Grimaldi *et al.* 1993). En esta condición, es imprescindible desarrollar usos multifuncionales ecoeficientes del suelo que permitan cumplir con todas las necesidades en suelos usados de forma sostenible.

“En la Orinoquia Colombiana persisten aún áreas extensas en donde se conserva el patrimonio natural 10 mil hectáreas” (WBSCD, 2000). La ampliación de la frontera agrícola es una amenaza potencial pero también una oportunidad para aumentar la producción de bienes y servicios ambientales de forma sostenible en sistemas intervenidos. La ocupación de nuevos espacios con poca planificación en el uso del territorio (Oyarzún *et al.* 2004. Janzen, 2004; Tilman *et al.* 2002). La falta de conocimiento integral del funcionamiento del paisaje y de su potencialidad; las políticas económicas de corto plazo soportadas por la falta de conocimiento de los productores sobre la oferta ambiental; constituyen elementos que pueden conducir a la degradación de las funciones productivas y ambientales de los suelos, llevando a la inviabilidad económica de los sistemas productivos y a la erosión de la condición social de sus pobladores.

Por lo mencionado anteriormente es necesario generar indicadores de ecoeficiencia que permiten generar herramientas para el desarrollo sostenible, que permitan evaluar el estado actual, la sostenibilidad económica y ambiental de los recursos debido a las

prácticas agrícolas que se realizan actualmente y el seguimiento en el tiempo. En el informe presentado por Leal (2005), sobre ecoeficiencia indica que:

- Los indicadores de ecoeficiencia de recursos naturales buscan así medir el uso absoluto de estos recursos, y los aumentos o disminuciones de productividad asociados, como un elemento para definir políticas de sostenibilidad. Estos indicadores no son diferentes de aquellos utilizados en la mayoría de las propuestas de indicadores de sostenibilidad desarrollados por organismos internacionales o países. No tienen esa pretensión de universalidad de los indicadores de sostenibilidad, entendidos como instrumentos de información para la política pública. Es importante tener en cuenta que los indicadores de sostenibilidad parecen haber conocido una fortuna más bien efímera, ya que no han tenido la aceptabilidad necesaria como para transformarse en la base para la toma de decisiones en materia de medio ambiente global. Algunos se han utilizado en reemplazo de los indicadores ambientales, pero la complejidad para aunar los factores ambientales, económicos y sociales más allá de ejercicios globales, ha hecho que se vuelva a los indicadores ambientales tradicionales, más prácticos al momento de hacer el seguimiento de las políticas ambientales.

2. Justificación

Es necesario desarrollar el uso multifuncional de los suelos para romper con la relación tradicionalmente negativa que hubo en el pasado entre el desarrollo económico y el estado del medio ambiental (MEA, 2005). Para llegar a este objetivo, es necesario concebir sistemas de producción y de uso de la tierra que representen el mejor compromiso posible entre la producción, la conservación de la biodiversidad y la integridad del suelo y de sus funciones. Estos sistemas calificados como eco eficientes son los que tienen la capacidad de ser económicamente rentables y sustentables, socialmente equitativos, mientras se mantiene la biodiversidad y las funciones ambientales.

La ecoeficiencia tiene que ser promovida a la escala del paisaje, sea el mosaico de tipos de uso que constituyen una finca, o un grupo de fincas ocupando una microcuenca. Se tienen que evaluar los tres términos (ambiental, económico y social) de eco eficiencia para entender el impacto de los diferentes sistemas de producción y reducir sus posibles efectos negativos.

Es por ello que cualquier propuesta tecnológica para el sector, debe evaluar su impacto sobre los servicios ambientales (calidad del suelo, control climático a través del ciclo del C, conservación de la biodiversidad, funciones hídricas y productividad presente y futura). A escala local y nacional, no existe información acerca del estado de muchos servicios de los ecosistemas y del valor económico de los servicios no comercializados. Además, rara vez se computan los costos del agotamiento de estos servicios. La información básica global sobre la extensión y las tendencias en los diferentes tipos de ecosistemas y usos del suelo es sorprendentemente escasa. Los modelos utilizados para proyectar las condiciones ambientales y económicas futuras tienen una capacidad limitada para

incorporar las “retroalimentaciones” ecológicas, incluyendo los cambios no lineales en los ecosistemas, las conductas de los individuos, o el aprendizaje que pueda generarse a través del manejo adaptativo de ecosistemas.

Es necesario comenzar por establecer indicadores sintéticos dentro de un enfoque de análisis ecosistémicos que permitan el monitoreo y la explicación del impacto, para orientar su desarrollo hacia una agricultura ecoeficiente, 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).

3.Hipótesis de la investigación

H1. Los sistemas productivos agrícolas de la altillanura plana en la Orinoquia Colombiana presentan buenas condiciones de ecoeficiencia

H2. Los sistemas productivos agrícolas de la altillanura plana en la Orinoquia Colombiana no presentan condiciones de ecoeficiencia

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Generar y comparar indicadores de ecoeficiencia de cinco sistemas de producción agrícola en la Altillanura plana ((sabana nativa, pastura mejoradas, cultivos transitorios (soya, arroz y maíz) y cultivos permanentes (caucho y palma de aceite)).

4.2 Objetivos Específicos:

- Evaluar componentes claves de la productividad, rentabilidad, bienestar social, biodiversidad y servicios ecosistémicos del suelo en cinco sistemas de producción de la altillanura plana.
- Determinar subindicadores sintéticos relacionados con la oferta ambiental y la oferta socioeconómica en la altillanura plana Orinocense para luego construir un indicador general de ecoeficiencia.
- Evaluar las condiciones que favorecen la ecoeficiencia de los sistemas presentes en la altillanura plana (parcelas, fincas y paisaje).

5. Marco Teórico y Estado del arte

La ecoeficiencia tiene sus orígenes en el concepto de desarrollo sustentable presentado en abril de 1987 por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente, en la Asamblea General de las Naciones Unidas. El resultado más importante de esta Comisión fue el reporte "Nuestro Futuro Común", también llamado "Reporte Brundtland", donde el desarrollo sustentable fue entendido como "el desarrollo que satisface las necesidades actuales, sin comprometer la capacidad de que generaciones futuras puedan satisfacer sus propias necesidades".

Posteriormente se buscó un concepto en el cual se involucraría todo el objetivo empresarial para el desarrollo sustentable. Con esto en mente, antes de la reunión mundial de Río de Janeiro en 1992, las empresas respondieron con un libro intitulado *Cambiando el Curso*, escrito por Stephan Schmidheiny para el entonces llamado Business Council for Sustainable Development (BCSD), actualmente WBCSD (Lehni 2000). El texto buscó desarrollar un concepto que, uniendo las mejoras ambientales y económicas, les mostrará a las empresas cual era el reto de la sustentabilidad. Ese concepto fue el de ecoeficiencia.

En el primer taller, celebrado en 1993 y en el que participaron individuos interesados en la ecoeficiencia, los integrantes estuvieron de acuerdo con la siguiente definición: "La ecoeficiencia se obtiene por medio del suministro de bienes y servicios a precios competitivos, que satisfagan las necesidades humanas y proporcionen calidad de vida, mientras progresivamente reducen los impactos ecológicos y el consumo de recursos a lo largo de su ciclo de vida, por lo menos hasta un nivel acorde con la capacidad de carga estimada de la Tierra", definición que adoptó la WBCSD (Lehni, 2000).

5.1 El concepto de Ecoeficiencia

La ecoeficiencia en la agricultura se puede definir como la capacidad de un sistema de uso de la tierra a ser económicamente rentable y sostenible, apto a sostener el desarrollo social con sus diferentes componentes (seguridad, acceso a los bienes básicos y a las redes sociales) y ambientales (conservación de la biodiversidad, óptima producción en servicios ambientales), donde Valderrama *et al*, 2004, nos define que:

- La ecoeficiencia es una cultura administrativa que guía al empresariado a asumir su responsabilidad con la sociedad, y lo motiva para que su negocio sea más competitivo, adaptando y readecuando los sistemas productivos existentes a las necesidades del mercado y del ambiente, y de esa forma consolidar niveles más altos de desarrollo económico, social y ambiental.
- La visión central de ecoeficiencia se puede resumir en "producir más con menos". Utilizar menos recursos naturales y menos energía en el proceso productivo, reducir los desechos, atenuar la contaminación, es definitivamente positivo para el ambiente, y a la vez, resulta beneficioso para la empresa porque sus costos de producción y operación disminuyen.
- Como meta final, la ecoeficiencia busca la elaboración de bienes y la prestación de servicios a precios competitivos que satisfagan las necesidades humanas y eleven la calidad de vida de la población. Al mismo tiempo, debe promover la reducción progresiva del impacto ambiental negativo de los productos, y procurar que su confinamiento esté dentro de la capacidad de carga de la Tierra.
- La ecoeficiencia guía al agricultor a asumir su responsabilidad con la sociedad, y lo motiva para que su negocio sea más competitivo, adaptando y readecuando los sistemas productivos existentes a las necesidades del mercado y del

ambiente, y de esa forma consolidar niveles más altos de desarrollo económico, social y ambiental.

La agricultura ecoeficiente permite optimizar el uso de los recursos, generando incrementos en la productividad sostenible y contribuye con el aumento en la oferta de alimentos. Permite a las fincas familiares competir en las economías locales y regionales, reduciendo así la pobreza. Limita la degradación de los recursos naturales causada por la agricultura, disminuyendo de ese modo su huella ecológica negativa, La agricultura eco – eficiente es más resistente ante los choques ambientales, como el cambio climático. También contribuye a una mayor equidad en las zonas rurales (CIAT, 2012).

La ecoeficiencia centraliza su visión en "producir más con menos". Aumentando el desarrollo local y regional, conservando el capital ecológico y humano, utilizando "menos recursos naturales y menos energía en el proceso productivo, reduciendo los desechos, atenuando la contaminación, es definitivamente positivo para el ambiente, y a la vez, resulta beneficioso para la finca porque sus costos de producción y operación disminuyen" (Valderrama *et al.*, 2004).

La ecoeficiencia se incrementa en los sistemas en los que existe un aumento de la producción agronómica empleando menos recursos, a través de una reducción de las pérdidas de insumos y sosteniendo e incrementando la producción potencial de la tierra. Debido al sostenido incremento de la población y los estándares de vida, no es suficiente con implementar prácticas de manejo que minimicen el impacto ambiental adverso, sino que, además, se requiere desarrollar prácticas que maximicen la producción agronómica, al tiempo que mejoren los servicios ecológicos. Es necesario identificar, desarrollar, validar y poner en práctica agroecosistemas que sean ecoeficientes (Lal, 2010).

La Agricultura Ecoeficiente presenta tres elementos fundamentales que son:

En lo Ambiental: “considera aquellos aspectos que tienen que ver con preservar y potenciar la diversidad y complejidad de los ecosistemas, su productividad, los ciclos naturales y la biodiversidad, siendo sostenible a través del tiempo” (Riechmann, 1995).

En lo Social: “considera el acceso equitativo a los bienes de la naturaleza, tanto en términos intergeneracionales como entre géneros y entre culturas, entre grupos y clases sociales y también a escala del individuo” (Achkar *et al.*, 2005).

En lo económico: incluye a todo el conjunto de actividades humanas relacionadas con la producción, distribución, consumo de bienes y servicios. Siempre buscando ser competitivo y que genere rentabilidad.

Beneficios y consecuencias

Las fincas que efectivamente implementan los programas de ecoeficiencia generan diferentes beneficios, como los expuestos por la Fundación Armonía Global (2008), tales como:

- Minimizará costos de producción.
- Utilizará de manera más responsable los recursos naturales.
- Reducirá la emisión de contaminantes.
- Será competitiva e innovadora en la producción.
- Obtendrá ingresos adicionales con el reciclaje y reusó de desechos.
- Gozará de prestigio entre distribuidores y consumidores.
- Tendrá acceso a nuevas oportunidades de mercado y cumplirá con estándares internacionales.
- Participará al desarrollo social de las comunidades.

Al mismo tiempo genera resultados positivos a nivel regional y global. “El aumento en los niveles de seguridad y desarrollo de recursos humanos motiva un panorama de equidad

social. La competitividad y rentabilidad provocados por la adopción de nuevas tecnologías se traduce en el crecimiento económico del agricultor y la región” (Valderrama *et al*, 2004).

Es tan de actualidad este tema que el manejo de la agricultura de forma eco – eficiente es un nuevo reto para la agricultura mundial, y a nivel de investigación instituciones como el CIAT “Centro Internacional de Agricultura Tropical – Tiene como misión reducir el hambre y la pobreza mejorando la salud humana en los trópicos mediante una investigación que aumente la ecoeficiencia de la agricultura”, esto pretende lograrlo impulsando la productividad agrícola para proveer alimentos nutritivos de bajo costo a la población de escasos recursos, haciendo que la agricultura sea más competitiva, brindando nuevas oportunidades a la población de escasos recursos para aumentar sus ingresos, y logrando un crecimiento agrícola que sea sostenible y menos dañino para el medio ambiente (CIAT, 2012).

5.2 Componente económico de la ecoeficiencia.

La eficiencia económica de una finca o de un sistema de producción se puede evaluar de una forma simple, dividiendo los ingresos netos de la finca por la superficie utilizada y por la cantidad de mano de obra empleada. (Azqueta Oyarzun, D. 1994) Los ingresos se determinan por el producto del rendimiento y el precio, donde Carles *et al.*, (1998) da a conocer:

Que mientras que los costos directos se valoran de forma sencilla una vez fijados los consumos físicos (p.ej., los fertilizantes y fitosanitarios dependen del tipo de productos y de la dosis) de cada factor de producción. En algunos casos la fijación del precio resulta sencilla (servicios exteriores, fitosanitarios y fertilizantes) mientras que en otros no lo es tanto, como en el caso del agua de riego. Las distintas procedencias y formas de gestionar el pago por el agua dificultan la adopción de un criterio homogéneo. No obstante, en los escenarios se ha incluido el origen del agua como una posibilidad más, ya que esta característica es la que más influye en los costos.

El componente económico “incluye a todo el conjunto de actividades humanas relacionadas con la producción, distribución, consumo de bienes y servicios, y resulta necesario redefinir conceptos de la economía tradicional, en especial los conceptos de necesidades materiales e inmateriales, sociales e individuales” (Achkar *et al.*, 2005).

El componente económico además de tomar en cuenta los costos visibles (productos de cosechas e insumos utilizados) existen costos y capitales invisibles que todavía no están tomados en cuenta como es (la biodiversidad, la fertilidad del suelo, el agua y las funciones hídricas, el clima (carbono, biomasa y gases), el componente humano, la educación y los servicios (Ribal, 2009)

La evolución de la agricultura en la Pampa Argentina ilustra como el no tomar en cuenta el costo de los servicios ambientales y del capital natural ha creado trastornos ambientales y sociales importantes. En los principios de los 90´as, Varela *et al.*, (2006) manifiesta que en Argentina:

El sistema agropecuario se caracterizó por una concentración de ingresos sin precedentes en la historia, la desaparición de los pequeños productores (basada en la “falta de competitividad” en el sistema económico dominante) y la exclusión y vulnerabilidad progresiva de los sectores agropecuarios. Todos aquellos que no pudieran o quisieran entrar, voluntariamente o forzados por las circunstancias, a la “rentabilidad” de la agricultura de la soya sobre la ganadería (base histórica de la fertilidad de los campos Argentinos) y potenciada por los paquetes simplificados del cultivo de la soya mayormente bajo sistemas de labranza cero, fueron desplazados por cuestiones económicas de sus predios, pueblos y comunidades rurales, para comenzar lentamente la pendiente hacia el sendero de la pauperización, y/o dependencia económica social, todo en aras de la competitividad y eficiencia económica de corto plazo.

Este modelo económico se parece mucho a la actualidad de los monocultivos en Colombia establecidos en la región de los Llanos orientales, donde el sistema que prevalece y produce una concentración en el uso de la tierra, atenta frente a la conservación de los recursos naturales y la migración del trabajador rural y sus familias. Si se siguiera totalmente la lógica de la economía actual el componente social y ambiental se dañarían porque en este sistema se privatizan los beneficios y se externalizarían los costos ambientales y sociales (MEA, 2005).

“Dentro de este contexto de sostenibilidad agraria, parece evidente que el primer requisito que debe cumplir una explotación para garantizar su perdurabilidad en el tiempo es que sea económicamente viable, ya que se trata de una actividad productiva” (Ribal, 2009). Dentro de los indicadores económicos se han dividido en cinco temas fundamentales que intentan cubrir los puntos clave de la sostenibilidad económica, que da a conocer Arandia *et al.*, (2008):

1. **Rentabilidad**, que tiene en cuenta el aspecto básico de capacidad de generación de un resultado económico ponderado por las variables básicas de producción: mano de obra, capital y dimensión de la explotación.
2. **Autonomía**, en el que se mide la influencia de factores externos en los resultados de la explotación, y la independencia de los mismos.
3. **Especialización**, en la que se define la estrategia elegida por las explotaciones que puede ser la especialización, o la diversificación, no medidas solo desde el punto de vista de la producción sino también desde el punto de vista de los nichos de mercado a los que se dirige (número y tipología de clientes).
4. **Producción**, analizando la productividad de los inputs y la relación entre la producción agraria frente a otras que conviven en el seno de la explotación o incluso de la familia agraria. Trata de dar por una parte un índice de eficiencia y por otra ponderar la repercusión de la actividad agraria en la pervivencia económica de los productores.
5. **Utilización de recursos**, mide la intensidad en la utilización de determinados recursos tanto productivos como de estructura y su relación con los parámetros básicos de dimensión de la explotación.

5.3 Componente social de la ecoeficiencia.

“La dimensión social: considera el acceso equitativo a los bienes de la naturaleza, tanto en términos intergeneracionales como entre géneros y entre culturas, entre grupos y clases sociales y también a escala del individuo” (Achkar *et al.*, 2005). Se toman también datos de natalidad, mortalidad, hogares de escasos recursos económicos, densidad poblacional, gasto público en salud, gasto público en educación, “analiza el fenómeno de desplazamiento rural según el tamaño de los pueblos, factores de migración obligada de trabajadores rurales y sus familias, concentración de mano de obra en las periferias urbanas” (Sili, 2005), despoblamiento de escuelas rurales, abandono de viviendas (Wiggering, *et al* 2006).

Algunos indicadores según la ONU, (2010) son el: “bienestar humano más directos que el ingreso per cápita, como los niveles de hambre, las tasas de mortalidad, la mano de obra infantil, la educación, el acceso a agua potable y la expectativa de vida, avanzan junto a la riqueza”, pues ésta ayuda a crear y proveer los medios para mejorarlos. A la vez Goklany, (2002) “manifiesta que estas mejoras pueden estimular el crecimiento económico, creando condiciones que conducen al cambio tecnológico e incrementando la productividad. De manera que la riqueza, la tecnología, y el bienestar se refuerzan recíprocamente en un círculo virtuoso de progreso”.

Para intentar reflejar de alguna manera el grado de sostenibilidad de las explotaciones desde un punto de vista social (Rigby *et al.* 2001), se han dividido este aspecto en siete temas que expone Arandia *et al.*, (2008):

1. **Carácter de la titularidad:** Se valoran positivamente aspectos como el vínculo del titular de la explotación con el sector agrario, la titularidad de las mujeres, la participación de jóvenes en las explotaciones, el asocio entre productores del sector, la garantía de continuidad y la explotación familiar.
2. **Creación y cantidad de trabajo:** Este tema está dividido en dos componentes propuestos por Van Calker *et al.* 2005. En primer lugar, la *creación de empleo viable*, porque entendemos que los sistemas capaces de generar un puesto de trabajo con menos activos, tanto territoriales, como materiales e inmateriales son preferibles desde un punto de vista social, al ser más accesibles para la entrada de jóvenes, el mantenimiento de puestos de trabajo. Además, estos empleos deben tener una mínima viabilidad económica, con una remuneración suficiente que los haga atractivos. En segundo lugar, la *cantidad de trabajo*, un aspecto que normalmente se recoge mediante la Unidad Trabajo por Año (UTA), que no refleja aspectos tales como la intensidad de este trabajo y la concentración del mismo, tanto diaria como anual.
3. **Calidad de vida y de trabajo:** Este tema también se divide en dos componentes muy ligadas entre sí. Por una parte, la *calidad del trabajo*, que tiene en cuenta aspectos como la autonomía en la toma de decisiones y la valoración personal del propio ganadero. Por otra parte, la *calidad de vida*, tema de gran complejidad, que ha intentado incorporar aquellos aspectos que los propios entrevistados consideraban más importantes en relación con su actividad.
4. **Bienestar animal:** se trata de recoger aspectos en los que incide la condicionalidad, entre los temas incluidos están, por ejemplo, la frecuencia de las visitas que se hace al ganado de manera rutinaria, la duración del pastoreo y la estabulación o la sanidad animal, que se ha querido reflejar mediante los gastos veterinarios y el porcentaje de reposición.
5. **Paisaje y sistemas tradicionales:** La preservación del paisaje tradicional es una de las principales funciones agrarias no comerciales que se valoran de manera positiva. A la creación de estos paisajes contribuyen elementos como la presencia de setos y bosquetes, construcciones tradicionales, muros de piedra, cromatismo en la siembra y otros más ligados con los sistemas tradicionales

como son los movimientos de ganado o la presencia de razas tanto autóctonas, como en peligro de extinción.

6. **Calidad de los alimentos:** La sociedad percibe como un aspecto importante de la agricultura la obtención de alimentos de calidad. Algunos de ellos pueden ser remunerados en el mercado por su clara identificación, como las indicaciones geográficas y las denominaciones de origen, los productos ecológicos.

7. **Proximidad a los consumidores:** Uno de los grandes problemas del sector agrario es el escaso conocimiento que existe, por parte de los consumidores finales, de los sistemas de producción agraria. En este sentido, actuaciones dirigidas a conectar a los agricultores con los consumidores se valora de manera positiva. Entre estas, se pueden citar el turismo rural, la transformación y venta directa, los circuitos cortos de comercialización y otros como las visitas de grupos a la explotación.

5.4 Componente ambiental de la ecoeficiencia.

Según Winograd, (1995); Achkar *et al.*, (2005) & Dávila, *et al.*, (2006) definen que los indicadores ambientales son:

Mecanismos que permiten articular los objetivos de la sustentabilidad. Su importancia radica en que, sectorial o integralmente, son formulados en un contexto único e irrepetible a nivel social, administrativo y territorial. Según la forma, información seleccionada y relaciones establecidas entre variables a evaluar, se obtendrán claves que indican la interpretación ideal de sustentabilidad impulsada por los gestores locales. Los indicadores pueden ser definidos como variables dotadas de significados, derivados de su propia configuración científica, que reflejan en forma sintética un interés social por el ambiente posible de ser incluido coherentemente en el proceso de toma de decisiones.

La dimensión ambiental: “considera aquellos aspectos que tienen que ver con preservar y potenciar la biodiversidad y la complejidad de los ecosistemas, su productividad y, los ciclos naturales” (Riechmann, 1995), haciendo énfasis en el cuidado del ambiente, en prácticas amigables, “preservación de la biodiversidad en la búsqueda de una armoniosa relación entre el hombre y la naturaleza” (Thornton & Cimadevilla, 2008).

La evaluación del componente ambiental requiere inventarios de biodiversidad y la medición de producción de los principales servicios ambientales en las fincas: control climático (a través de almacenamiento de C en suelos y biomasa, tasa de erosión y emisiones de gases a efecto de invernadero), soporte nutricional de la producción primaria medido con análisis de almacenamiento de nutrientes, polinización y control biológico de las plagas (Paruelo *et al*, 2005, Zaccagnini, 2003, Casas, 2006).

5.4.1 . Servicios ambientales.

1. *Biodiversidad*: (Ingenieros del ecosistema: hormigas, lombrices de tierra y termitas) producen “bienes y servicios para satisfacer nuestras necesidades de aire puro, agua limpia, alimentos, medicamentos y protección. También produce satisfacciones como recreación, inspiración y emociones”. La pérdida de la biodiversidad es un proceso irreversible y que se manifiesta en la reducción de suelos muy productivos, en el incremento de los residuos de origen antrópico y en la destrucción de bancos de pesca y en el aumento de las especies en riesgo de extinción.

Es por eso que es necesario proponer medidas para proteger y recuperar las estructuras y funcionamiento de los sistemas naturales de tal manera que se ponga fin al empobrecimiento de la biodiversidad por lo cual es necesario:

- Proteger y restaurar los paisajes, los animales y las plantas y el desarrollo sostenible de los bosques.

- Proteger y restaurar los hábitats marinos, el litoral y las aguas interiores.
- Incorporar medidas de acción común en la protección de los suelos.
- Integrar acciones políticas de protección de la naturaleza y la biodiversidad presente en zonas de estudio.
- Mejorar las tareas de información e investigación en el ámbito de la protección a la naturaleza.

2. *Servicios hídricos*: (abastecimiento y reserva de agua): comprenden los beneficios que produce a las personas y a los ecosistemas terrestres tener agua dulce para su uso. Estos beneficios se pueden organizar en cinco grandes categorías: a) El abastecimiento de agua de extracción, b) El abastecimiento de agua en fuentes hídricas, c) la mitigación de daños causados por el agua, d) el suministro de agua relacionados con los servicios culturales, y e) el mantenimiento de hábitats acuáticos que producen servicios.

Para entender la ciencia hidrológica tradicional en un contexto de servicios de los ecosistemas, es necesario concentrarse en cuatro características principales de cada servicio: a) cantidad, b) calidad, c) ubicación y d) tiempo de flujo

3. *Servicios climáticos*: (secuestro de C y emisiones de gases) en la producción agrícola, “el uso del concepto de balance de carbono, que permite visualizar el beneficio ambiental que la agricultura ecoeficiente aporta, al comportarse como sumidero neto de carbono”, al mismo tiempo Espada, (2013) da a conocer que:

La agricultura es un sector estratégico básico que al tiempo que produce alimentos, retira CO₂ de la atmosfera, se nos presenta como un instrumento idóneo para colaborar con el consumidor, en la mitigación del cambio climático,

en este momento en que la inquietud del cambio climático está modificando los esquemas de funcionamiento del mercado. Esta colaboración, solo es posible desde las agriculturas eco eficientes, es decir, aquellas que obtengan un balance positivo de carbono, fijando más CO₂ del que emiten y comportándose como un sumidero neto de CO₂.

Según la FAO, (2002). *"El mundo tendrá que utilizar todas las opciones para contener el calentamiento global dentro de los dos grados centígrados. La agricultura y el uso de la tierra tienen el potencial de ayudar a minimizar las emisiones netas de gases de efecto invernadero a través de prácticas precisas, en especial almacenar carbono en el suelo y la biomasa. Estas prácticas pueden incrementar al mismo tiempo la productividad y la capacidad de resistencia de la agricultura, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y la reducción de la pobreza"*.

Según Jumilla *et al.*, (2010). *"La agricultura del futuro debe incluir como objetivo fundamental, la mitigación del Cambio Climático. El logro de este objetivo debe implicar la mejora continua para que el balance de carbono sea cada vez más positivo, es decir, cada vez los cultivos fijen más CO₂ y sea necesario emitir menos para su producción y transporte hasta los centros de consumo"*.

4. *Servicios de producción*: (fertilidad química, control inicial, cambios en el uso de la tierra, "introducción o remoción de especies, adaptación y uso de tecnologías, insumos externos como la irrigación" (MEA, 2005). "El proceso de producción es el procedimiento técnico que se utiliza en el proyecto para obtener bienes y servicios a partir de insumos y se identifica como la transformación de una serie de éstos para convertirlos en productos mediante una determinada función de producción" (Anónimo, s.f).

El manejo de los nutrientes en los sistemas agropecuarios afecta varias categorías de impacto en el "ACV" análisis del ciclo de vida (desde la entrega de las materias primas

tomadas del ambiente hasta las consecuencias ambientales de su uso, este principio implica la consideración de la producción agropecuaria para generar un producto como son el almacenaje, tratamiento y acondicionamiento del producto como alimento, la distribución y finalmente su consumo). Los recursos más importantes para la producción de fertilizantes son los combustibles fósiles y fosfato (mineral).

Todo esto se realiza con el fin de conservar o mejorar el estado de la biodiversidad y aumentar la producción de servicios ambientales

5.4.2 Macrofauna del suelo y servicios ambientales.

La biodiversidad es un tema muy amplio y diverso ya que la vida se diversifica a diferentes escalas (población, comunidad, ecosistema y paisaje) y entre una gran cantidad de formas de vida (Figura 1).

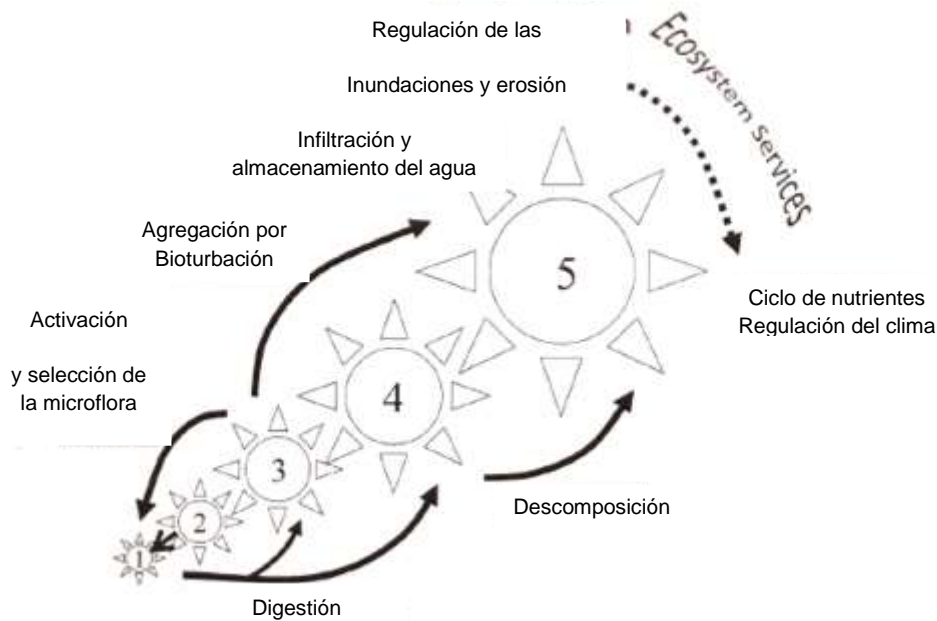
Muchas veces no hay relación entre la biodiversidad de los diferentes grupos de animales, plantas o microorganismos (Lavelle, *et al* 2010) lo que teóricamente obligaría a analizar un gran número de grupos diferentes. En este proyecto, se escogió la macrofauna del suelo por ser un grupo muy diverso (16 órdenes representados), relativamente fácil de muestrear con el método estándar TSBF (Lavelle, 1988; Anderson and Ingram, 1993) y por la gran importancia que tienen varios de estos grupos en el funcionamiento del suelo siendo los ingenieros del ecosistema los más importantes (Jones *et al.*, 2004; Lavelle *et al.*, 2016)

Efecto de los organismos ingenieros del suelo en la determinación de los servicios ambientales

De hecho, el efecto de la macrofauna en los procesos del suelo ha sido ampliamente revisado (Curry, 1994; Edwards and Bohlen, 1996; Paoletti, 1999; Lavelle y Spain, 2001). La macrofauna en la calidad del suelo se puede usar como bioindicador de las comunidades de organismos, y entre sus funciones promueven procesos importantes en el suelo, “por ejemplo la descomposición en la materia orgánica, formación de estructuras, ciclaje de nutrientes y control de enfermedades” (Lee & Foster, 1991; Linder *et al.*, 1994; Doube *et al.*, 1994; Pankhurst *et al.*, 1995; Pankhurst *et al.*, 1996; Edwards & Bohlen, 1996; Brown *et al.*, 1999; Blouin *et al.*, 2005).

Lavelle, (1997) ha mostrado que la macrofauna y en especial los “Ingenieros del ecosistema” (lombrices, hormigas y termitas especialmente) ejercen una gran influencia sobre la diversidad, la actividad de la biota y de los niveles tróficos subordinados, por ejemplo, transformadores de hojarasca, microdepredadores y en la microflora como transformador fundamental de nutrientes. *Esta relación entre la actividad y la diversidad de los “Ingenieros del ecosistema y las propiedades físicas y químicas del suelo influyen en: la heterogeneidad estructural del suelo, la estabilidad de los agregados, la distribución horizontal y vertical de la M.O, la infiltración y retención de agua”* (Blanchart *et al.*, 1999; Decaëns *et al.*, 1999).

Figura 1. Interacciones entre los organismos del suelo a diferentes escalas que permiten su participación en la producción de servicios ambientales.



(Fuente: Lavelle *et al.* 2004)

1. La regulación de la actividad de microorganismos y otros pequeños invertebrados incluidos en sus “dominios funcionales” (conjunto de estructuras biogénicas que la macrofauna crea en el suelo y los organismos que allí habitan) (Lavelle, 1997). Trabajos recientes mostraron efectos significativos de la macrofauna en la composición de la microflora encontrada en las estructuras biogénicas que ellos producen (Tiunov y Scheu, 1999; Tiwari y Mishra, 1993; Maraun *et al.*, 1999; Diouf, 2003; Kersanté, 2003).
2. La digestión de cantidades significativas de materia orgánica del suelo (MOS) que resulta en la liberación de nutrientes asimilados por las plantas y la acumulación de materia orgánica humificada en sus estructuras biogénicas que queda protegida de la descomposición en sus estructuras biogénicas (Martín, 1991; Parmelee *et al.*, 1998; Lavelle *et al.*, 2001).
3. Mantenimiento de las propiedades físicas del suelo por la construcción de galerías y macroporos y la formación de macro agregados estables, (Lee & Wood, 1971; Mando *et al.*, 1997; Blanchart *et al.*, 1999).

4. Estimulación de la producción de plantas a través de la liberación, asimilación de nutrientes (Spain & Okello – Oloya, 1985; Brussard, 1997; Brown *et al.*, 1999; Blouin *et al.*, 2005)

Todas estas características, hacen que la macrofauna sea un buen indicador de la calidad y de la sostenibilidad del uso del suelo ella está en contacto directo con la solución del suelo y con los minerales de este, afecta también, a través de su actividad, las comunidades de organismos más pequeños e influye sobre las propiedades físicas, químicas y morfológicas del suelo (Velásquez, 2004).

5.4.3 Las lombrices de tierra.

“Las lombrices de tierra representan la mayor biomasa animal en la mayoría de ecosistemas terrestres, y allí donde son abundantes pueden procesar a través de sus intestinos hasta 1000 toneladas de suelo al año por hectárea” (Martín, 1991; Domínguez *et al.*, 2009).

Las comunidades de lombrices se modifican cuando los bosques y sabanas naturales son sustituidos por los agroecosistemas, el origen (nativas o exóticas) de las especies es un indicador importante, la distribución de las especies entre los grupos funcionales (epígeas, endógeas, anécicas), que tienen diferentes efectos sobre la función del suelo indica el tipo de estructuras y los efectos globales que ellas tienen. Varios estudios muestran que las comunidades de lombrices en los agroecosistemas, en comparación con los de los ecosistemas no alterados, tienen una menor riqueza de especies, menor número de especies nativas, menor número de grupos funcionales y un predominio de endógeas (Werner, 1989; Bohlen *et al.*, 1995; Fragoso *et al.*, 1997; Didden, 2001; Martínez *et al.*, 2006; Zhiping *et al.*, 2006; Decaëns *et al.*, 2010)

Por tanto, el papel de las especies endógeas en los agroecosistemas intensificados es probablemente importante para la función del suelo, mientras las epigeas y anécicas están muchas veces ausentes (Lavelle and Pashanasi, 1989; Lavelle and Fragoso, 2000. Lavelle and Spain, 2001; Lavelle, 2002;) las lombrices endógeas actúan como ingenieros del ecosistema, desarrollando interacciones mutualistas con la microflora, ingiriendo las partículas del suelo de forma selectiva, produciendo estructuras que a su vez efectúan las propiedades hídricas de los suelos a mayores escalas (Fragoso *et al.*, 1997).

En el mejoramiento de la producción primaria, el papel de las lombrices depende de la localización (en el mismo lugar), la sincronización (al mismo tiempo) de sus actividades con el período y la esfera de crecimiento de las raíces activas y demandas nutrientes (Brown *et al.*, 1999).

5.4.4 . La agregación, un atributo esencial para la conservación de los suelos.

La agregación es una propiedad del suelo “que determina importantes propiedades de este, como la estructura, infiltración, retención de agua y almacenamiento de carbono y por ende, su capacidad a resistir a la erosión. La macrofauna del suelo, especialmente los ingenieros del ecosistema (lombrices, termitas y hormigas, principalmente)” (Velásquez *et al.*, 2007), producen muchas estructuras biogénicas que una vez estabilizadas forman macro agregados resistentes. Las raíces también tienen fuerte poder de agregación del suelo, solas o en asociación con las lombrices de tierra (Zangerlé *et al.*, 2011)

El análisis morfológico del suelo de Velásquez *et al* 2007 modificada de Ponge (1999) es una técnica: “Descriptiva que permite diferenciar y cuantificar, constituyentes orgánicos y minerales del suelo organizados en agregados, estructuras biogénicas particulares, componentes vegetales y piedras. Definen los constituyentes del suelo de acuerdo a su

forma (esférica, redonda o alargada), tamaño, origen (mineral, orgánico)”. La actividad de la macrofauna y las diferentes bioestructuras que estos producen pueden ser cuantificadas y relacionadas por medio de esta característica (Velásquez, 2004).

El análisis morfológico muestra como el mal manejo del suelo afecta la agregación mediante la disminución de la macrofauna (Velásquez, 2007)

5.5 . Ecoeficiencia del Paisaje.

Se define como la capacidad de usar los recursos naturales (aquí el suelo) de una forma eficiente que permita el desarrollo económico, pero a la vez la conservación de la biodiversidad y la producción sostenible de servicios ambientales de interés local (control de plagas), regional (agua) o global (regulación del clima). Desarrollar la ecoeficiencia significa romper con el paradigma de la relación inversa entre productividad y calidad del medio ambiente.

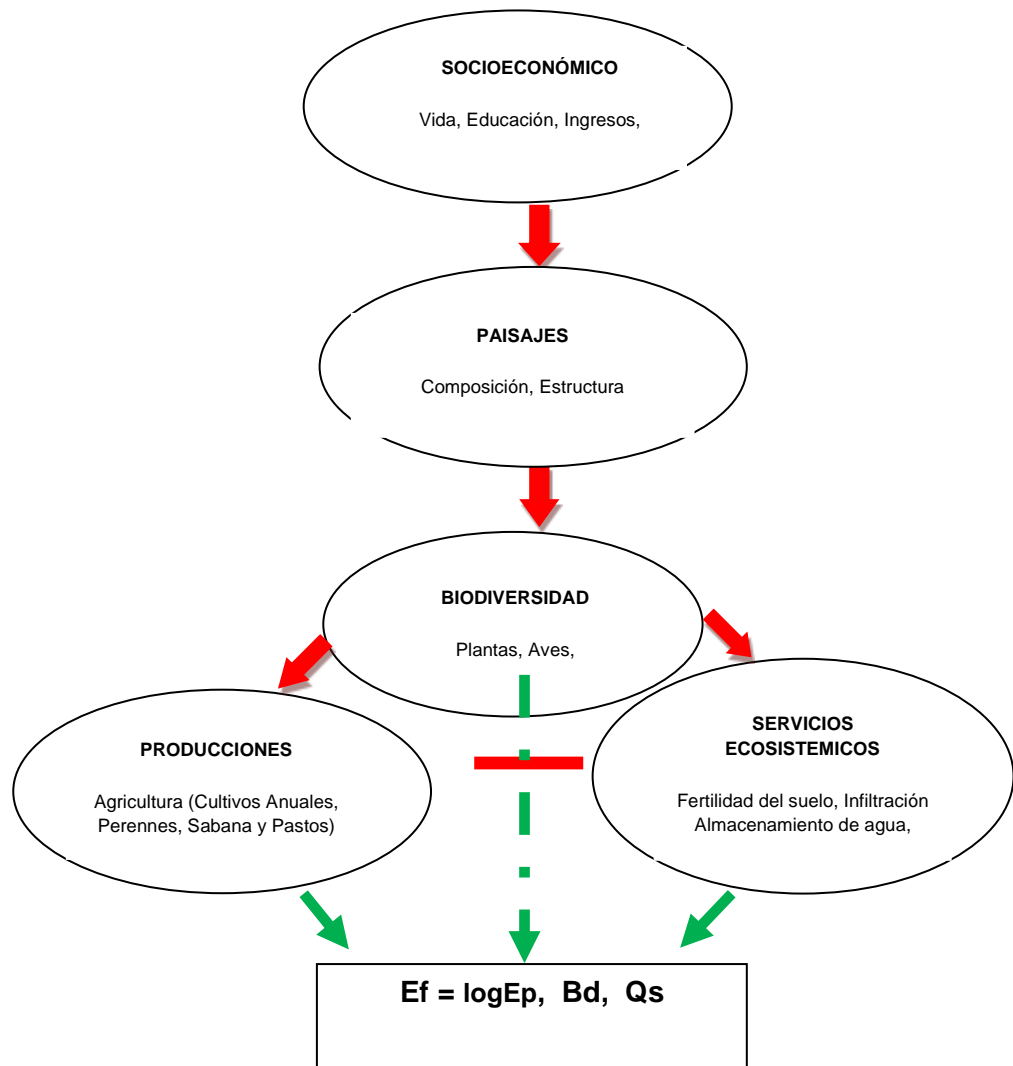
Lavelle *et al.*, (2016) proponen un indicador para medir la ecoeficiencia que es el producto de tres términos independientes o componentes principales de la Ecoeficiencia (Figura 2):

1. **Ep**: la eficiencia de la producción que es el ingreso anual de la finca por unidad de superficie y por unidad de mano de obra (norma UTE);
2. **Qs**: es un indicador de los servicios ambientales que sintetiza los diferentes elementos de la calidad del suelo: la fertilidad química, la calidad física, la agregación y la materia orgánica. El Qs varía entre 0.1 y 1.0, conforme aumenta la calidad del suelo;
3. **Bd**: indicador de la biodiversidad calculado a partir de la biodiversidad de los principales grupos del suelo o del medio aéreo, que también varía entre 0.1 y 1.0

4. Y **Sb**, un indicador de bienestar social basado en un puntaje de todos los elementos definidos por las comunidades como importantes para su bienestar. Este integra elementos materiales (disponibilidad de electrodomésticos, de medios de transporte...), sociales (seguridad, asociatividad), demográficos (familia, migraciones) y educativos (nivel de escolaridad).

El indicador de ecoeficiencia ha sido aplicado por primera vez en sistemas de producción de la Amazonia deforestada en Caquetá (Lavelle et al., 2016). Mostró resultados muy contrastantes entre los tres sistemas de producción predominantes del área. La ganadería extensiva tiene los índices más bajos debido al uso de grandes superficies donde la producción es relativamente baja mientras la calidad del suelo es baja (suelos degradados) y la biodiversidad también mínima. Los sistemas de producción diversificados con agroforestería, al contrario, tienen una productividad mucho mayor mientras la calidad del suelo y la biodiversidad son mucho mayores también, con valores elevados del indicador. Los sistemas silvopastoriles presentaron valores intermedios, las fincas con este sistema empiezan a mostrar aumento en la calidad, biodiversidad y producción.

El indicador de ecoeficiencia está propuesto como “una herramienta para poner metas y medir los alcances y el impacto de políticas públicas que busquen desarrollar el uso multifuncional sostenible y eficiente de los suelos”.

Figura 2. Componentes principales de la Ecoeficiencia.

(Fuente: Lavelle *et al.*, 2016)

5.6 Indicadores: definición y evolución.

Siguiendo la definición dada en UNCTAD Sturm *et al.*, (2004) un indicador es: “una medida específica de cierto elemento para demostrar su rendimiento a través del reconocimiento y valoración de información relevante. Utilizando esta definición, se pueden construir diferentes indicadores para un mismo elemento, dependiendo de la información disponible”; estos pueden ser tanto cualitativos como cuantitativos.

En particular, los indicadores de ecoeficiencia miden la relación entre “el funcionamiento ambiental y el funcionamiento financiero, y su consecuencia sobre la sociedad, para ciertos problemas ambientales globales. Para este trabajo, se analizaron diferentes modelos de indicadores desarrollados con base en el concepto de ecoeficiencia, utilizando las siguientes definiciones generales” (Sturm & Müller, 2001):

Según Rincón, Eric, & Wellens (2011), los indicadores de ecoeficiencia son:

Valores numéricos asociados a un proceso o producto, que pueden calcularse al incluir numeradores o denominadores tan diversos como el usuario lo desee (Nakaniwa 2004). Así se logra identificar aquellas áreas de la empresa en las cuales se están provocando mayores desperdicios o pérdidas de recursos, así como posibles oportunidades de inversión. Los indicadores, por esta razón, son considerados como una herramienta de toma de decisiones, de evaluación del funcionamiento de la empresa y de comunicación para inversionistas internos y externos; ver por ejemplo Verfaillie y Bidwell (2000), CEBDS (2003), Michelsen *et al.* (2006), Montes Vásquez (2008), Sinkin *et al.* (2008).

De acuerdo con los autores anteriores, los indicadores de ecoeficiencia se pueden dividir en dos clases:

- Los primeros son válidos para virtualmente todos los negocios. Se les denomina indicadores de "aplicación general" o "genéricos" y están considerados por la mayoría de los modelos. Estos indicadores se han diseñado para temas o problemas ambientales mundiales que han sido discutidos y para los cuales hay un acuerdo o consenso internacional como son el deterioro de la calidad del agua, el calentamiento global, el deterioro de la capa de ozono y problemas de residuos peligrosos.

- Los segundos se ajustan al contexto particular de compañías individuales y no necesariamente son aplicables para las demás compañías; son llamados indicadores "específicos del negocio".

Para medir la contribución de una compañía a los problemas ambientales es necesario contar con factores de conversión que ayuden a determinar que tanto contribuye el uso de cierta sustancia a un problema ambiental específico. Por ejemplo, el uso de energía eléctrica contribuye al calentamiento global, pero para determinar el tamaño de esta contribución se requiere de un factor o valor numérico que convierta los kilowatts–hora en toneladas de dióxido de carbono.

En países como Japón (Nakaniwa 2004) y Australia (Van Berkel 2004) existen compañías que ya se encuentran utilizando los indicadores de ecoeficiencia. Sin embargo, en ninguno de estos dos casos se logró unificar las necesidades de todos los sectores empresariales y por lo tanto el desarrollo e implementación de estos indicadores continúa abierto.

En Canadá, The National Round Table on the Environment and the Economy (NRTEE, 2001), un organismo independiente que proporciona a inversionistas, empresarios y al público canadiense consejos y recomendaciones para promover el desarrollo sustentable, desarrolló una metodología que busca la estandarización de definiciones y de reglas para el cálculo y divulgación de indicadores de ecoeficiencia, tanto genéricos, como específicos. Esta metodología ofrece la ventaja de manejar información detallada y completa; además permite que el usuario determine el tipo de denominadores que se utilizarán. Sin embargo, esta libertad para definir el denominador complica la comparación de indicadores entre diferentes empresas (NRTEE, 2001).

“También se analizó la metodología propuesta por la organización internacional WBCSD, que proporciona abundante información para el desarrollo, implementación e

interpretación de indicadores de ecoeficiencia para cualquier tipo de empresa” (WBCSD 2006). Sin embargo, los datos son considerados incompletos ya que no ofrecen factores de conversión que permitan determinar, por ejemplo, la contribución al calentamiento global provocado por el uso de combustibles fósiles, además de permitir, al igual que en la propuesta hecha por NRTEE, 2001 que sea el usuario quien determine el tipo de denominadores que utilizará. De nuevo, aunque estos indicadores permiten a la empresa determinar su ecoeficiencia, la comparación entre empresas se vuelve complicada.

Por último, se analizó el manual o guía para usuarios y preparadores de indicadores de ecoeficiencia presentado por UNCTAD (Sturm *et al.* 2004). Este manual propone una metodología que permite calcular, reconocer, medir y divulgar los siguientes cinco ecoindicadores.

Estos indicadores pueden ser utilizados por todas las empresas a través de todos los sectores, por lo que son indicadores genéricos más que específicos. Además, el procedimiento para calcularlos es único y no debe ser modificado por el usuario, por lo cual es posible comparar las declaraciones de ecoeficiencia entre diversas empresas (Sturm y Müller 2001). Finalmente, el manual incluye una gran variedad de factores de conversión calculados para cada uno de los indicadores que propone.

Es importante mencionar que durante el proceso de investigación se encontró una propuesta desarrollada por el Ministerio de Medio Ambiente de Colombia, en convenio con PROPEL (Promoción de la Pequeña Empresa Ecoeficiente Latinoamericana) que expone un modelo gráfico para evaluar la sustentabilidad de empresas del sector PyME, relacionando su desempeño ambiental con la competitividad integral (López y Torres 2001). Colombia es el único país latinoamericano que presenta una propuesta, propia y diferente, para expresar el desempeño ambiental de una empresa, aunque no incluye el cálculo de ningún cociente.

5.7 . Biodiversidad y bioindicadores.

Un importante recurso que se pierden los sistemas actuales de manejo es la biodiversidad. Esta responde de manera significativa, por diferentes vías, a las perturbaciones causadas por el manejo de humano, “provocando cambios en la abundancia y estructura de las comunidades biológicas”. (Vandermeer and Perfecto, 1995; Richarson, 1987; Jeffrey and Maddend, 1991; Paoletti and Pimentel, 1992).

La biodiversidad, “es entendida como la riqueza específica de plantas, animales y microorganismos que existen e interactúan dentro de un ecosistema, es un parámetro que permite valorar la estructura y la transformación del medio” (Paoletti, 1999).

Los bioindicadores pueden usarse como predictores de la biodiversidad y de la actividad biológica para evaluar la sostenibilidad del uso del medio, desde el nivel de parcela hasta el nivel de paisaje. El estado de los indicadores describe las condiciones del medio y permite evaluar los efectos de las prácticas de manejo o restauración. Por ejemplo, los bioindicadores pueden utilizarse para monitorear el efecto del uso de plaguicidas en la agricultura (Pimentel, 1997; Paoletti, 1997) o evaluar la eficiencia de acciones de recuperación de áreas contaminadas (Van Straalen and Krivolutskii, 1999).

Un bioindicadores puede ser definido como una especie o grupo de especies que reaccionan de una forma específica a ciertos tipos de cambio ambientales Paoletti & Bressan, 1996; Van Straalen, 1997). Ejemplos de especies indicadoras pueden ser especies que normalmente no pueden vivir fuera del bosque. Especies que viven únicamente en pastizales o en áreas cultivadas, aquellas que soportan altos niveles de contaminantes en sus tejidos, especies que reaccionan a prácticas particulares en el manejo del suelo y aquellas que soportan estrés hídrico (Paoletti, 1999).

El uso de pequeños invertebrados como herramienta de evaluación de los daños causados en el ambiente tales como el efecto de prácticas agrícolas (uso de plaguicidas,

labranza, fertilización química, lodos residuales, pisoteo , monocultivo) aparece como una buena estrategia ya que las especies que componen sus comunidades presentan una gran diversidad de reacciones a distintos efectos, la composición y estructuras de estas comunidades proporcionan mucha información, aunque muchas veces solamente entendible por especialistas con alto nivel de formación (Paoletti, 1999).

5.7.1 La macrofauna como bioindicador.

Lavelle (1997) ha mostrado que la macrofauna y en especial los “Ingenieros del ecosistema” (lombrices, hormigas y termitas especialmente) ejercen una gran influencia sobre la diversidad, la actividad de la biota y de los niveles tróficos subordinados, por ejemplo, transformadores de hojarasca, microdepredadores y en la microflora como transformador fundamental de nutrientes. Esta relación entre la actividad y la diversidad de los “Ingenieros del ecosistema” y las propiedades físicas y químicas del suelo influyen en: la heterogeneidad estructural del suelo, la estabilidad de los agregados, la distribución horizontal y vertical de la M.O, la infiltración y retención de agua (Decaëns *et al.*, 1999; Blanchart *et al.*, 1999).

La macrofauna cumple diversas funciones en los procesos del suelo tales como:

- La utilización de cantidades significativas de materia orgánica del suelo (MOS) para producir estructuras biogénicas (Lavelle *et al.*, 2001).
- La regulación de la actividad de microorganismos y otros pequeños invertebrados incluidos en sus “dominios funcionales” (conjunto de estructuras biogénicas que la macrofauna crea en el suelo y los organismos que allí habitan) (Lavelle, 1997). Trabajos recientes mostraron efectos significativos de la macrofauna en la composición de la microflora encontrada en las estructuras biogénicas que ellos producen (Tiunov y Scheu, 1999; Tiwari y Mishra, 1993; Maraun *et al.*, 1999; Diouf, 2003; Kersanté, 2003).
- Mantenimiento de las propiedades físicas del suelo, (Lee and Wood, 1971; Mando *et al.*, 1997; Blanchart *et al.*, 1999).

- Regulación de la dinámica de los MOS en diferentes vías en una escala de tiempo, desde horas y días hasta meses, años y décadas (Martín, 1991; Parmelee *et al.*, 1998).
- Acelera el proceso de mineralización durante el tránsito por su intestino, a menudo estimula la producción de plantas a través de la liberación, asimilación de nutrientes y a través de numerosas interacciones (Spain and Okello – Oloya, 1985; Brown *et al.*, 1999; Brussard, 1997)

Todas estas características, hacen que la macrofauna sea un buen indicador de la calidad y de la sostenibilidad del uso del suelo ella está en contacto directo con la solución del suelo y con los minerales de este, afecta también, a través de su actividad, las comunidades de organismos más pequeños e influye sobre las propiedades físicas, químicas y morfológicas del suelo (Velásquez, 2004).

Las lombrices de tierra para Domínguez *et al.*, (2009) en su revisión representan:

La mayor biomasa animal en la mayoría de ecosistemas terrestres, y allí donde son abundantes pueden procesar a través de sus cuerpos hasta 250 toneladas del suelo al año por hectárea. Las lombrices influyen de forma muy significativa en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y otorga a estos organismos un papel crucial en la modificación de la estructura del suelo, en la aceleración de la descomposición de la materia orgánica y del reciclado de nutrientes, que tiene a su vez efectos muy importantes sobre las comunidades vegetales que viven por encima de la superficie del suelo.

La biodiversidad de las lombrices se ve modificada cuando los bosques y sabanas naturales son sustituidos por los agroecosistemas, estos cambios pueden ser estudiados a partir de la taxonomía y punto de vista funcional. En el primer caso el número y el origen (nativas o exóticas) de especie es importante, así como la escala geográfica del estudio (local o regional). El enfoque funcional considera a los grupos ecologistas (epígeas, endógeas, anécicas), que tienen diferentes efectos sobre la función

del suelo. Estudios realizados revelan que las comunidades de lombrices en los agroecosistemas (en comparación con los de los ecosistemas no alterados) tienen una menor riqueza de especies, menor número de especies nativas, menor número de grupos ecologistas y un predominio de endógeas (Fragoso *et al.*, 1997)

Por tanto, el papel de las especies endógeas en los agroecosistemas de intensificación es probable que sea más importante para la función del suelo, sobre todo porque actúan como ingenieros del ecosistema través de sus interacciones mutualistas con la microflora, selectiva la ingestión de las partículas del suelo, las altas tasas de ingestión y la producción de moldes, galerías, túneles y cámaras de nutrientes puede afectar la dinámica de la materia orgánica y otros procesos edafológicos (Fragoso *et al.*, 1997).

Las especies epígeas y anécicas no parecen ser amplias en los sistemas agrícolas y su dependencia de una capa de hojarasca para su supervivencia implica que las prácticas de gestión de la hojarasca deben ser implementadas por su papel en la función del suelo (Fragoso *et al.*, 1997).

El papel de las lombrices en el mejoramiento de la producción primaria depende de la localización (en el mismo lugar) y la sincronización (al mismo tiempo) de sus actividades con el período y la esfera de crecimiento de las raíces activas y demandas nutrientes. Varios estudios de campo han encontrado un aumento significativo de rendimiento con la inoculación de las lombrices de tierra, las variaciones de campo de la población, las estrategias ecológicas de corto y largo plazo sobre las propiedades del suelo, además de la planta y los factores ambientales (clima, suelo, cultivo y período de gestión de los agroecosistemas), son esenciales para valorar adecuadamente el papel potencial de las especies de lombrices de tierra especialmente en planta en producción (Fragoso *et al.*, 1997).

5.7.2 . Indicadores de la calidad física y química de suelos.

Existe un amplio rango de indicadores que podrían medirse en el suelo, los cuales varían en magnitud e importancia, de acuerdo a la discrepancia de científicos (Pankhurst et al., 1997). Estos indicadores deben medir “propiedades del suelo que influyen en la calidad y el funcionamiento de este” (Acton y Padbury, 1993).

Larson y Pierce (1991) propusieron una serie mínima de datos como parámetros del suelo que se pueden adoptar para valorar la calidad y salud del suelo y para estandarizar metodología y procedimientos de valoración (Tabla 1).

Teniendo en cuenta, que la base del estudio de un indicador debe ser simple y fácilmente valorado por diferentes personas en distintas situaciones y adecuado para la evaluación en grandes áreas, no siempre es fácil medir todas estas variables sugeridas (Velásquez, 2004).

5.7.3 Morfología del suelo.

La agregación es un importante atributo del suelo, según Velásquez *et al.*, (2007):

Determina importantes propiedades de este, como la estructura, infiltración, retención de agua y almacenamiento de carbono. La macrofauna del suelo, especialmente los ingenieros del ecosistema (lombrices, termitas y hormigas, principalmente) se asocian fuertemente a la formación de la estructura del suelo y son determinantes importantes de los procesos del suelo que influyen en el ciclo de nutrientes, en la formación de agregados y en la permeabilidad del suelo.

Tabla 1. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo

Indicadores de la condición del suelo	Relación de condición y función del suelo, Relación como una medida prioritaria	Valores/ Unidades ecológicas relevantes; comparación por evaluación
<p>Físicos</p> <p>Textura</p> <p>Profundidad del suelo superficie del suelo y enraizamiento</p> <p>Infiltración y densidad volumétrica del suelo (DVS)</p> <p>Capacidad de retención del agua</p>	<p>Retención y transporte de agua y químicos erosión del suelo y estimación de la variabilidad.</p> <p>Estimación de la productividad potencial y erosión; normalización en el paisaje y variabilidad geográfica.</p> <p>Potencial para leaching, productividad y erosividad; necesidad de ajustar análisis volumétricos básicos.</p> <p>Relación de retención del agua, transporte y erosividad; disponibilidad de H₂O, cálculo de DVS, textura y MO</p>	<p>% Arena, limo y arcilla; pocos sitios erodados o posiciones en el paisaje</p> <p>Cm o m; sitios no cultivados o variedad en las posiciones del paisaje.</p> <p>Minutos por 2.5 cm de agua y Mg cm², hileras y/o posiciones en el paisaje.</p> <p>% (Mg cm³), cm disponibles de agua por 30 cm: intensidad de precipitación</p>
<p>Químicos</p> <p>Materia Orgánica del suelo (M.O) Total de C y N orgánico)</p>	<p>Definir fertilidad del suelo, estabilidad y extensión de erosión; Uso de modelos de procesamiento y de normalización por sitio.</p> <p>Definir umbral de actividad biológica y química; esencial</p>	<p>Kg. C o N ha¹ -30 cm; no cultivado o control nativo</p>

<p>pH</p> <p>Conductividad eléctrica</p> <p>N, P y K</p>	<p>para el proceso de modelización.</p> <p>Definir umbrales de plantas y actividad microbial; actualmente faltan más procesos de modelización</p> <p>Disponibilidad de nutrientes para plantas y perdida potencial de N; indicadores de productividad y calidad del medio ambiente</p>	<p>Comparar limites altos y bajos en plantas y actividad microbial</p> <p>ds m¹; comparar limites altos y bajos en plantas y actividad microbial</p> <p>Kg. ha¹ – 30 cm; periodos suficientes para el crecimiento del cultivo</p>
<p>Biológicos</p> <p>Biomasa microbial C y N</p> <p>Mineralización de N (incubación anaeróbica)</p> <p>Respiración del suelo, contenido de agua y temperatura.</p>	<p>Potencial de catalizadores microbiales y reposición de C y N; Modelización: advertencia temprana de los efectos de MO</p> <p>Productividad del suelo y abastecimiento de N potencial; proceso de modelización; (indicador de biomasa)</p> <p>Medida de la actividad microbial (plantas en algunos casos) proceso de modelización; estimación de la actividad de la biomasa</p>	<p>Kg. N o C ha¹ – 30 cm; C y N total o CO₂ producido</p> <p>Kg. N ha¹ – 30 cm d¹ contenido de C o N total</p> <p>Kg. C ha¹ d¹; actividad de la biomasa microbial, perdida de C vs. entrada y reserva total de C</p>

Fuente: (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; Seybold et al., 1997).

La morfología y las comunidades de macrofauna en el suelo cumplen un papel importante como lo expone Velásquez *et al.*, (2007):

La morfología del suelo permite evaluar la actividad de algunos grupos de macrofauna del suelo a través de las bioestructuras que estos crean, estos agregados modifican la estructura del suelo, las propiedades hidráulicas (infiltración y almacenamiento de agua) y el secuestro de carbono, determinando a su vez, cambios importantes en la adaptación de las comunidades de plantas. En general, las comunidades de macrofauna modifican la estructura del suelo permitiendo una alta actividad biológica, lo cual indica probablemente una alta calidad en los procesos del suelo (almacenamiento de C y de agua) y una óptima regulación biológica en el funcionamiento de este. La estrecha correlación entre las comunidades de macrofauna y las variables morfológicas mediadas a través de la técnica de morfología, permite verificar la hipótesis que los cambios en las comunidades de plantas se deben a los cambios de las comunidades de macro invertebrados y su influencia sobre la estructura del suelo.

Es una técnica descriptiva que permite diferenciar y cuantificar, constituyentes orgánicos y minerales del suelo organizados en agregados, estructuras biogénicas particulares, componentes vegetales, piedras, etc. Empleando la metodología de Ponge (1999), con algunas modificaciones se definen los constituyentes del suelo de acuerdo a su forma (esférica, redonda, alargada, etc.), tamaño, origen (mineral, orgánico), etc. La actividad de la macrofauna y las diferentes bioestructuras que estos producen pueden ser cuantificadas y relacionadas por medio de esta característica (Velásquez, 2004).

6. Materiales y Métodos

Se realizaron muestreos distintos para las partes socioeconómica y ambiental. Después de analizar cada base de datos obtenida, se usaron los valores de respectivos sub indicadores, sociales, económicos y ambientales medidos en los sitios comunes a las dos bases para calcular indicadores de ecoeficiencia.

6.1 Evaluación Ambiental

De acuerdo con los objetivos del proyecto se definieron parcelas de cultivos en 41 fincas (Anexo 1) correspondientes a cultivos transitorios: maíz (TM), soya (TS), arroz (TA), pradera mejorada (PM) 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 el transecto entre Puerto López, Puerto Gaitán incluyendo CNI Carimagua en la Altillanura plana del departamento del Meta.

Cada sitio de muestreo (75 puntos) ubicado en cada uno de los predios y sistemas, constó de tres puntos separados a 200 m entre sí, considerados estos como repeticiones, para un total de 225 puntos que fueron geo-referenciados con el GPS Garmin® etrex, (Figura 3) bajo los siguientes criterios de selección:

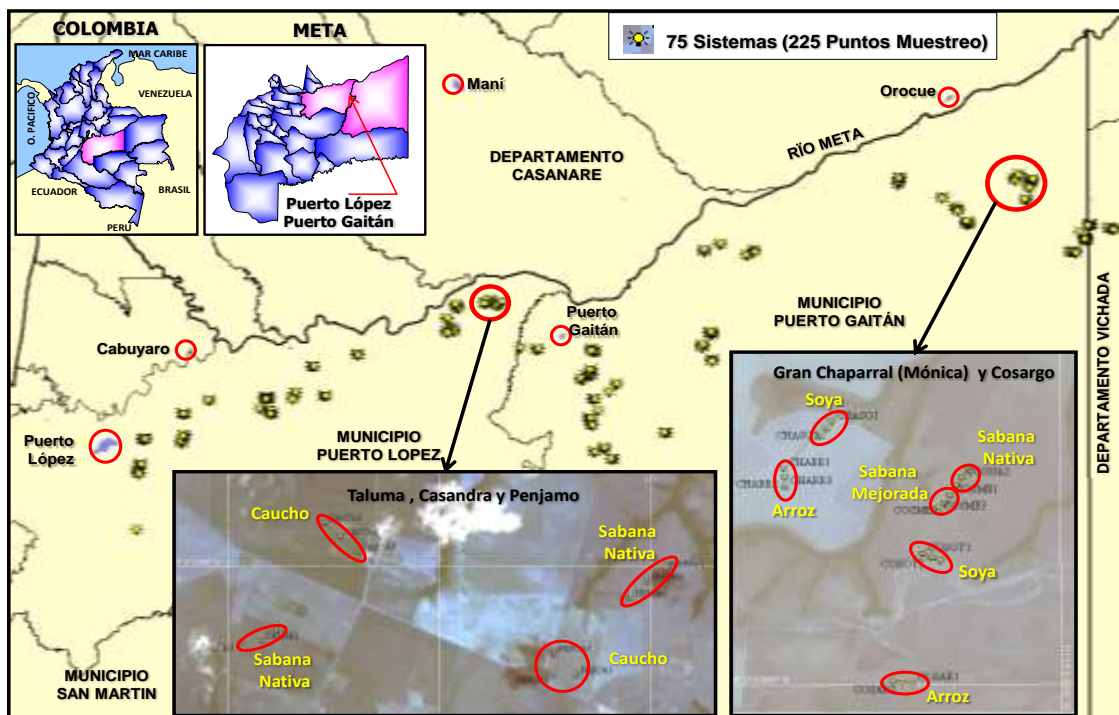
1. El área de estudio presenta gradientes en parámetros climáticos tales como: distribución de la precipitación y humedad relativa que da lugar a cuatro unidades a saber (Gobernación del Meta & IGAC, 2004):

- a. B1: Ligeramente húmedo: Con un factor de humedad entre 21% y 40%, precipitaciones entre 1900 mm y 2200 mm, temperatura superior a 26.6°C (sector de Carimagua – límite departamento del Vichada)
 - b. B2: Moderadamente húmedo: Con un factor de humedad entre 41% y 60%, precipitaciones entre 2100 mm y 2300 mm, temperatura entre 25.0°C y 25.3°C
 - c. B3: Húmedo: Con un factor de humedad entre 61% y 80%, precipitaciones entre 2600 mm y 2800 mm, temperatura entre 26.0°C y 26.2°C
 - d. B4: Muy húmedo: Con un factor de humedad entre 81% y 100%, precipitaciones entre 2700 mm y 2800 mm, temperatura entre 24.8°C y 26.0°C (sector de Puerto López).
2. Los sistemas están localizados en la unidad de suelos de altiplanicie o altillanura plana; de acuerdo con IGAC, 2004 se encontró tres unidades de suelos AVCa, AVDa y AVEb, que en términos generales se diferencian en que la primera (AVCa) presenta un clima edáfico-údic¹ y las otras unidades un clima edáfico ústico.
3. Los sistemas están ubicados en microcuencas diferentes, una que tiene recarga de acuíferos de la zona de montaña tales como: ríos y drenajes sector sur del río Meta y otras microcuencas que nacen en la altillanura tales como la de los ríos Yucao, Guarrojo y Muco.

¹El 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 y La temperatura media anual del suelo es isohipertérmico con 22 °C o mayor

Igualmente se realizó una revisión de la cartografía disponible respecto a la distribución de los usos y coberturas actuales (Palma, forestales, caucho, transitorios (soya-maíz-arroz), pasturas, sabana nativa, bosques de galería, entre otros), encontrándose que para el área de estudio no existía un trabajo reciente y a una escala adecuada, motivo por el cual y previendo futuras fases de proyectos (monitoreo de captura de carbono, afectación de bosques de galería, trabajos de planificación y ordenamiento del territorio, etc.) se utilizó imágenes satelitales recientes (2009 a 2011) y de alta resolución (pixel de 10 metros)

Figura 3. Ubicación de los sistemas bajo estudio. Departamento del Meta, municipios de Puerto López y Puerto Gaitán.



Fuente: CIAT, 2012.

Se midieron parámetros tanto bióticos como abióticos del suelo: Gases efecto invernadero (GEI), macro-fauna, físicos y químicos. Adicionalmente se determinó la producción de biomasa

6.1.1 Aspectos asociados al indicador de fertilidad de suelos.

La selección de los puntos de muestreo se realizó teniendo en cuenta las zonas de mayor representatividad dentro de las parcelas, en ese sitio, se tomaron las muestras de suelo a las profundidades de 0-10 cm y 10-20 cm, con 3 repeticiones distanciadas mínimo 200 m. (Figura 4) y (Tabla 2).

Figura 4. Toma de muestras para análisis químico cerca de la cámara instalada.



(Foto Rodríguez, 2011)

Se determinaron las siguientes propiedades químicas en cada una de las profundidades:

Tabla 2. Propiedades químicas de suelo evaluadas y metodología para su determinación

Variable	Método utilizado
pH relación 1:1 (Agua: suelo).	Potenciómetro. (IGAC, 2006)
S⁺² (mg/kg)	Azufre Extractable (Fosfato Ca) Turbidimetría. (IGAC, 2006)
Materia Orgánica	Walkley-Black – Espectrometría Molecular (IGAC, 2006)
K⁺¹ (cmol/kg)	Potasio Intercambiable. Espectrometría de absorción atómica (IGAC, 2006)
Ca⁺² (cmol/kg)	Calcio Intercambiable. Espectrometría de absorción atómica (IGAC, 2006)
Mg⁺² (cmol/kg)	Magnesio Intercambiable. Espectrometría de absorción atómica (IGAC, 2006)
Al⁺³ (cmol/kg)	Aluminio Cambiable (KCl 1M) Volumetría (IGAC, 2006)
Na⁺¹ (cmol/kg)	Sodio Intercambiable. Espectrometría de absorción atómica (IGAC, 2006)
CIC (cmol/kg)	Capacidad Intercambio Catiónico (Amonio Acetato) Volumetría (IGAC, 2006)
B⁺³ (mg/kg)	Espectrometría Molecular (IGAC, 2006)
Fe⁺³ (mg/kg)	Hierro Extract. Doble Acido Ab.At. Espectrometría de absorción atómica (IGAC, 2006)
Mn⁺² (mg/kg)	Manganeso Extract. Doble Acido Ab.At. Espectrometría de absorción atómica (IGAC, 2006)
Cu⁺² (mg/kg)	Cobre Extract. Doble Acido Ab.At. Espectrometría de absorción atómica (IGAC, 2006)
Zn⁺² (mg/kg)	Zinc Extract. Doble Acido Ab.At. Espectrometría de absorción atómica (IGAC, 2006)

Realizado por: Rodríguez, 2011.

Las variables químicas fueron analizadas en el Laboratorio de Servicios Analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT-Palmira) con métodos clásicos.

6.1.2 . Aspectos asociados al indicador de función hídrica de suelos

En cada uno de los puntos donde se tomaron las muestras descritas anteriormente (0-10 cm y 10 – 20 cm), Se tomaron muestras de suelo disturbado y sin disturbar para determinar las propiedades físicas del suelo (Figura 5) y (Tabla 3):

Tabla 3. Propiedades físicas de suelo evaluadas y metodología para su determinación

ANÁLISIS	MÉTODO	DETALLE
Conductibilidad hidráulica.	Carga Constante (IGAC, 2006)	Característica del suelo en muestras sin disturbar, recolectada en un cilindro
Curva hidrofísica	Ollas a Presión (IGAC, 2006)	
Densidad Aparente	Cilindro de volumen conocido (IGAC, 2006)	
Densidad Real	Balón (IGAC, 2006)	
Contenido de humedad en el suelo	Gravimétrico (IGAC, 2006)	Característica del suelo en muestras disturbadas, recolectada en bolsa
Textura por Bouyoucos	Hidrómetro (IGAC, 2006)	
Estabilidad Estructural (DPM)	Yoder (IGAC, 2006)	

Realizado por: Rodríguez, 2011.

A partir de los resultados de laboratorio se realizó el cálculo de agua disponible, porosidad total y el porcentaje de distribución por tamaño de los mismos (macroporos, mesoporos y microporos).

Figura 5. Toma de muestras en anillo para determinar densidad aparente.



(Foto Rodríguez, 2011)

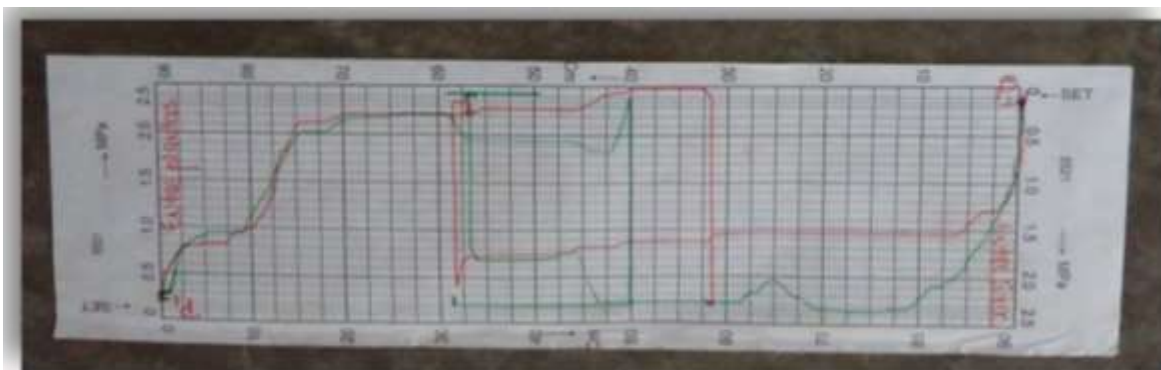
La determinación de las variables descritas anteriormente se realizó en el laboratorio de física de suelos CORPOICA C.I. La Libertad.

Como una prueba adicional a las determinaciones de física en el laboratorio, se llevó a cabo en campo la evaluación de la resistencia mecánica a la penetración a través del penetrometro de cono marca Eijkelkamp (Figura 6). Estas pruebas, se realizaron también en todos los puntos asociados a los anillos para determinación de Gases con Efecto Invernadero (GEI).

Figura 6. Resistencia a la penetración en cultivo de caucho.

Medidas entre surcos

Punto o cámara 1.



Color verde primera medida

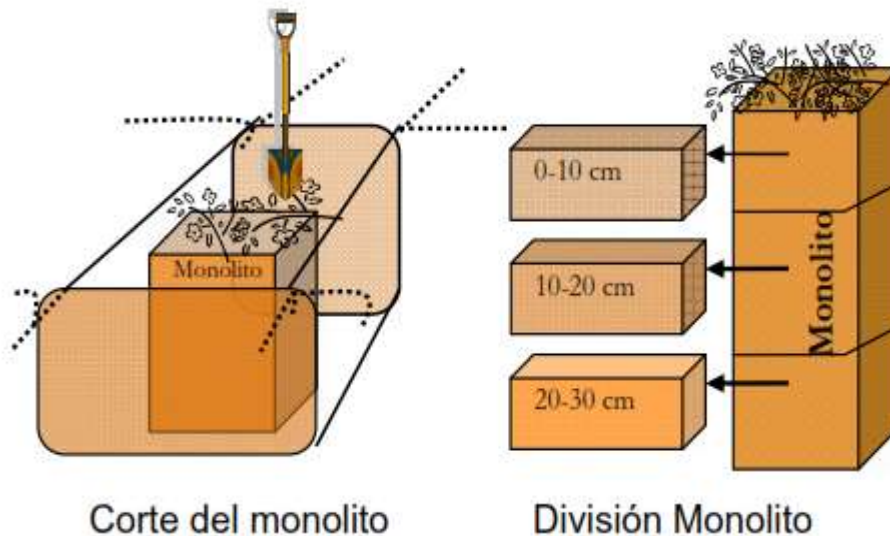
Color rojo segunda medida

(Foto Rodríguez, 2011)

6.1.3 . Aspectos asociados al indicador de Biodiversidad (macrofauna)

El muestreo se hizo siguiendo la metodología del Tropical Soil Biology and Fertility Programme (TSBF) (Anderson & Ingram 1993), que se basa en la captura y recolección de organismos del suelo, (visibles al ojo humano), para determinar presencia y densidad de población en un volumen de suelo conocido. La técnica consiste en hacer un “monolito”, con ayuda de un marco metálico de 25 cm. de largo por 25 cm. de ancho y 10 cm. de profundidad en los tres puntos asociados a los anillos instalados para determinación de GEI y considerados como repeticiones. En las repeticiones 1 y 3 se consideraron las muestras a dos profundidades 0-10 cm. y 10-20 cm., las mismas para las determinaciones físicas y químicas, mientras que para la repetición 2 se incluyó una profundidad adicional, de 20-30 cm. (Figura 7).

Figura 7. Representación del procedimiento de toma de muestras en las tres profundidades.



(Fuente Velásquez, 2004)

El protocolo, validado en el marco del proyecto ADEME Bioindicateurs de Francia, Ruiz *et al.*, 2008 implica que luego de enterrar el marco, éste, se retira con todo el suelo contenido para luego empacarlo en costales previamente rotulados (Figura 8) para su posterior separación de individuos.



Figura 8. Toma de muestra y empaque en costal rotulado

(Foto Rodríguez, 2011)

Después de recolectadas las muestras, se realizó una separación detallada de todos los invertebrados del suelo visibles a simple vista. 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%. (Figura 9) Cada uno de los frascos estaban rotulados con la zona, el sistema y el punto donde fueron colectados.

La metodología TSBF (Anderson & Ingram 1993) se basa en la cuantificación de densidad de población, (individuos m^{-2}), 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. Esta clasificación se realizó en el laboratorio de Biología de Suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT-Palmira).

Figura 9. Separación de individuos y almacenamiento de muestras de macro-fauna



(Foto Rodríguez, 2011)

6.1.4 . Aspectos asociados al indicador de control climático (Medición de gases efecto invernadero (GEI)).

En cada parcela y sistema de referencia se evaluaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), generadas por el suelo donde los gases evaluados fueron el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O). Los muestreos se efectuaron mensualmente y durante cuatro meses consecutivos: junio, julio, agosto, septiembre de 2011. Para llevar a cabo el trabajo se decidió utilizar la técnica de la cámara cerrada con desfogeo, Conen y Smith, 1998; IAEA, 1992 citado por Rondón, 2001 con la estandarización realizada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (Chu, H. et al., 2007). La técnica es muy utilizada por ser simple de operar y con costos más bajos respecto a otras técnicas.

La selección de los puntos de monitoreo se realizó teniendo en cuenta las zonas de mayor representatividad dentro de cada lote, allí, fueron instaladas 3 cámaras distanciadas como mínimo 200 m, (Figura 8) cada una constituyendo una repetición.

Cada anillo de PVC sin tapa ni parte inferior, con una altura 8 cm. y un diámetro de 25 cm. fue enterrado 5 cm en el suelo, los anillos permanecieron todo el período de estudio. A estos puntos se asoció la determinación de las demás variables. Al momento de cada muestreo se colocó la tapa de la cámara constituida por un anillo de PVC con tapa y sin parte inferior, altura 10cm, y diámetro 25cm. Esta se colocó sobre el anillo de PVC previamente instalado en la parcela, con el fin de formar la cámara cerrada. Para evitar fugas en la cámara cerrada, se utilizó una banda de caucho en la unión de la cámara y el anillo.

Figura 10. Cámara instalada en campo para el monitoreo de los gases efecto invernadero CO_2 , NO_3 y CH_4 .



(Foto Rodríguez, 2011)

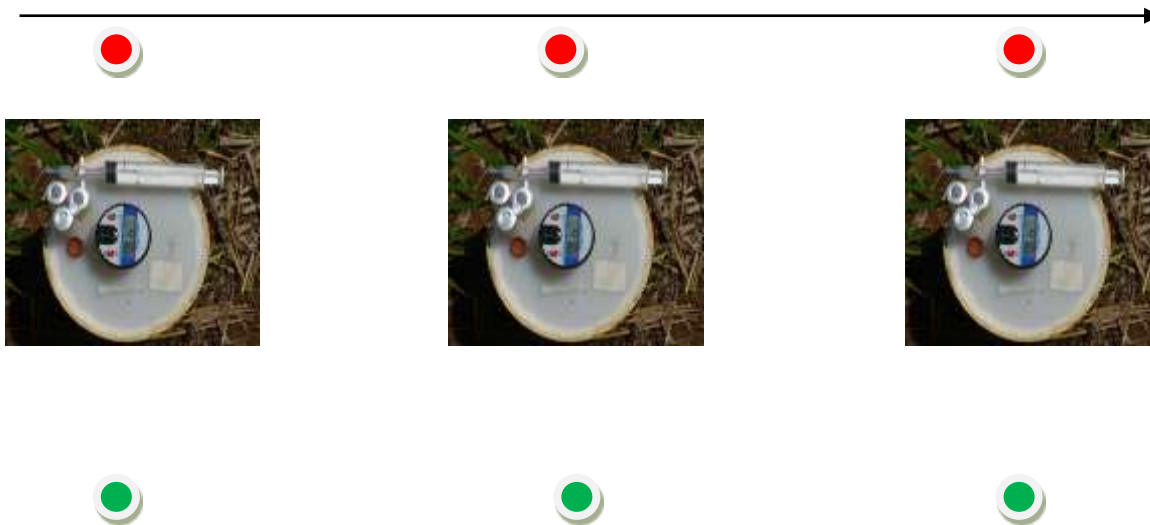
De cada una de las cámaras y en cada fecha de muestreo, se tomaron 3 muestras individuales de aire, (Figura 9) una muestra antes de colocar la tapa que corresponde al tiempo 0 y luego cada 20 minutos hasta completar 40 minutos. Las muestras de aire se extrajeron de la cámara cerrada a través de un séptum con una jeringa la cual dispone de una válvula adaptada, posteriormente se colocaron en frascos de vidrio al vacío, para su posterior envío al laboratorio. En cada cámara cerrada se registraron datos de temperatura en grados centígrados, con un termómetro digital y se registró la humedad

del suelo tomando una muestra del mismo punto a una profundidad entre los 0 y 10 cm, en un área aledaña a la cámara. La metodología fue la siguiente:

- ✓ Cultivos transitorios (maíz, soya y arroz) y también para la sabana natural y pastura mejorada (Figura 11), se tomaron dos repeticiones por cámara, tomando la primera gráfica a la derecha de la misma (verde) y la segunda a la izquierda (rojo) según la ubicación de las otras dos así:

Las mediciones se tomaron a un metro aproximadamente de cada una de las cámaras y en los gráficos plasmados en el papel milimetrado están representados de la misma manera: color verde para la primera medición y color rojo para la segunda. En todos los casos se tomó la muestra de humedad 0-20 cms en la primera medición (color verde).

Figura 11. Puntos de medición resistencia en cultivos transitorios.

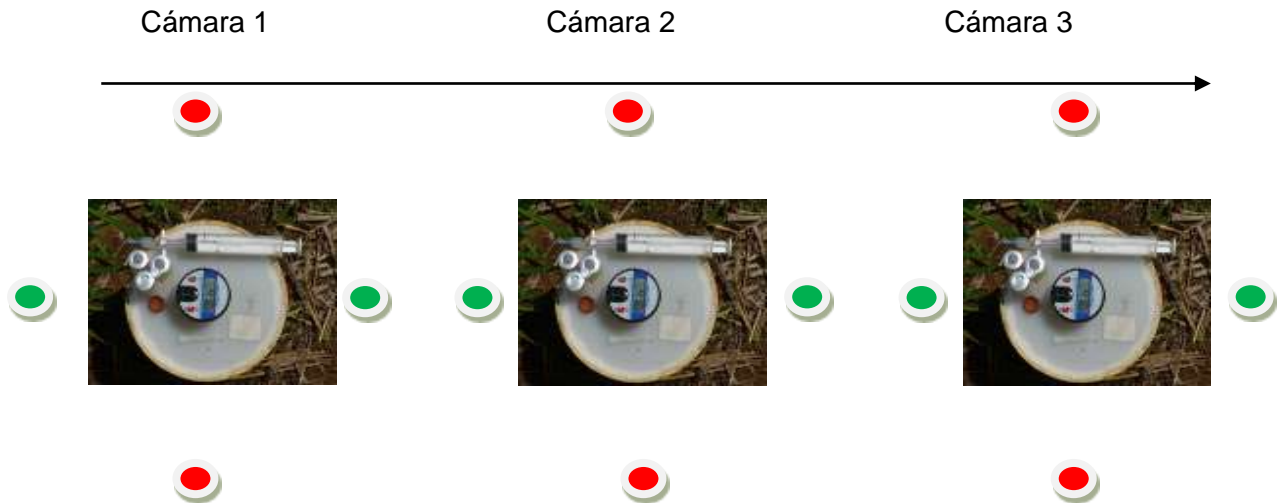


(Foto Rodríguez, 2011)

- ✓ Cultivos permanentes (caucho y palma), Figura 12: Se tomaron cuatro repeticiones por surco (dos entre plantas y dos entre surcos) ya que la resistencia a la penetración es distinta en calles donde han sido mecanizadas respecto al surco entre plantas que no han sido intervenidas.

Ubicación de las cámaras en campo

Figura 12. Puntos de medición cultivos permanentes.



(Foto Rodríguez, 2011)

Las primeras mediciones se tomaron entre plantas (color verde) y las segundas entre surcos (color rojo), la muestra de humedad del suelo (0-20 cm) se tomó en el primer punto entre plantas ya que ha sido una zona sin disturbar. Se siguió la metodología de primer punto a la derecha y segundo a la izquierda según la dirección de las cámaras. En palma se comenzó como se describió anteriormente, pero al notar que tanto la distancia entre calles como entre surcos era mecanizada, se procedió a tomar solo dos puntos como en cultivos transitorios.

Cada una de las gráficas (Figura 13), se encuentran marcadas al reverso con la información de la zona, nombre de la finca, sistema, punto (cámara), fecha y alguna observación para documentar el dato. En total se tomaron gráficas de penetración en setenta y seis parcelas productivas en las tres zonas Carimagua, Puerto Gaitán, Puerto López y en el C.I. La Libertad en el cultivo del caucho como punto de verificación.

Figura 13. Almacenamiento de muestra de gas en vial al vacío



(Foto Rodríguez, 2011)

Las muestras colectadas 2700 en total, se analizaron en un cromatografo de gases (ShimadzuGC-14A, Figura 14), equipado con un detector de ionización de llama (FID) para el análisis de metano y un detector de captura de electrones (ECD) para el análisis de óxido nitroso. Para la determinación de las concentraciones de CO₂, 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 registra 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 en cada sistema de producción. Dichos análisis se efectuaron en el Laboratorio de Servicios Ambientales del Centro

Internacional de Agricultura Tropical (CIAT-Palmira) los valores se pueden observar en el (Anexo 2) para cada gas evaluado.

Figura 14. Cromatógrafo de gases utilizado para análisis de metano y óxido nítrico.



(Foto Rodríguez, 2011)

6.1.5 Aspectos asociados al indicador de control climático (Determinación de carbono en biomasa aérea de los cultivos).

En los cultivos transitorios (soya, arroz y maíz) así como en las pasturas tanto mejorada como sabana nativa, se tomaron muestras de biomasa con la ayuda de un marco de PVC de 50cm de ancho por 50cm de largo (2500 cm²), (Figura 15) para determinar el contenido de carbono en el tejido vegetal. Se tomó una muestra asociada a cada repetición.

Figura 15. Toma de muestras de biomasa en sistemas de soya y sabana nativa.



(Foto Rodríguez, 2011)

Cada muestra de biomasa fue pesada en una balanza de campo con precisión de $\pm 0.01\text{g}$ y empacada en bolsas de papel rotuladas para luego ser llevadas a peso constante en un horno a 60°C , para luego relacionar la variable de peso seco con el área del marco multiplicado por un factor de conversión 0.5 para transformar toneladas de biomasa seca a toneladas de carbono por hectárea.

En los cultivos permanentes tanto caucho como palma y siguiendo la metodología sugerida por Mac Dicken (1997) se delimitó un área de 35m de ancho por 35m de largo en cada repetición para un área de muestreo de 1225 m^2 , a los árboles que quedaban incluidos dentro del cuadro, se les tomó altura utilizando un hipsómetro LáserAce® y diámetro del tallo a la altura del pecho (DAP), Figura 12. Posteriormente, con ésta información y para no efectuar análisis destructivo, se emplearon ecuaciones alométricas, (Tabla 4), para estimar la biomasa de estas especies.

La biomasa obtenida fue multiplicada por 0.5 para estimar el contenido de carbono (IPCC 2007) (Anexo 2).

Figura 16. Medición de altura a través de un hipsómetro y DAP de tallo respectivamente.



(Foto Rodríguez, 2011)

Tabla 4. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa en palmas y caucho.

USO DEL SUELO	ECUACIÓN	FUENTE
Caucho	$\text{Log } B = \beta + \alpha (\text{logCAP})^*$	Snowdon 2002
Palmas	$B = 4,5 + 7,7 * H^{**}$	Frangi y Lugo (1985)

(Fuente Snowdon, 2002; Frangi y Lugo, 1985)

* $\text{Log } B = \text{Biomasa en kilogramos}$, $\beta = -2.3858$, $\alpha = 2.5956$

** $B = \text{biomasa arriba del suelo (kg individuo-1)}$; $dap = \text{diámetro a la altura del pecho (cm)}$; $H = \text{altura total (m)}$.

6.2 . Aspectos asociados al indicador socioeconómico (Determinación de las condiciones socioeconómicas).

Considerando que los sistemas productivos manejados por los productores de la altillanura en el departamento del Meta están conformados principalmente por cultivos transitorios, cultivos permanentes y pradera mejorada, se tomó como unidad de análisis el cultivo desde una perspectiva local y desde una perspectiva de “parcela”, dentro de cada predio analizado.

La metodología en lo que respecta a obtener información que contribuyera desde una perspectiva socioeconómica a la construcción del indicador de ecoeficiencia, consistió en una estrategia de acopio y revisión de información de fuente primaria, referida a las parcelas, a partir del diseño de un instrumento para toma de información para cada sistema productivo, el cual contempló variables que contribuyeran al análisis de la

eficiencia económica, tecnológica, ambiental y social para la construcción de los indicadores social y económico.

Para esta parte del estudio se utilizaron las encuestas realizadas por el CIAT en 51 fincas ubicadas en 31 veredas de los municipios de Puerto Gaitán incluyendo CNI Carimagua y Puerto López. La encuesta conto con 227 preguntas organizadas en 13 bloques así: Identificación del predio (12 preguntas), Información del encuestado (5), Información del productor (11), Información de trabajadores, (4) Historia del predio (11), Aplicación de correctivos al suelo (9), Labranza (14), Fertilización (14), Control de malezas (29), Control de plagas y enfermedades (29), Pastoreo (37), Razones de adopción de nuevos cultivos (5), Capacitación (11) (Anexo 3). Complementario a esto, se realizó acopio y revisión de información de fuente secundaria de lo referente áreas de siembra y costos de producción de los distintos cultivos.

Después de seleccionar las variables que más separan las fincas, se agruparon en tres grupos para definir respectivos sub indicadores de capital humano (social), sistema de producción (económico), y paisaje con las variables describiendo la locación del terreno a diferentes usos en las fincas. El indicador de paisaje que se pudo construir a partir de los datos de composición permitirá evaluar la relación entre el diseño espacial de la finca y los diferentes componentes del indicador de ecoeficiencia.

Con el mismo juego de datos se definieron tipologías clasificando las fincas de acuerdo a su paisaje, su sistema de producción y su capital humano.

6.3 Indicador de ecoeficiencia

Se construyó una tabla de datos que reunía las fincas comunes a los dos estudios, socioeconómico (51 fincas) y ecológico (75 parcelas ubicadas en 32 diferentes fincas). Se estableció de esta forma una tabla que reúne 51 parcelas (11 praderas mejoradas, 15

cauchos, 5 soya, 5 arroz, 2 maíz, 11 palmas de aceite, 2 sabanas nativas), distribuidas entre 26 fincas. A cada parcela se adjuntaron los datos socioeconómicos de la finca. De esta forma, se pudo verificar la hipótesis que parcelas con la misma cobertura pueden tener diferentes niveles de producción de Servicios Ecosistémicos por su entorno social, económico o por el paisaje.

El indicador de ecoeficiencia se calculó sumando los tres sub indicadores.

6.4. Metodología Estadística

El tratamiento de datos que se hizo tuvo como meta principal el diseño y cálculo de indicadores. Los indicadores transforman la enorme cantidad de variables medidas en valores cuantitativos sintéticos que reflejan los diferentes aspectos ambientales, sociales o económicos de cada finca permitiendo así una comparación precisa y una clasificación de todas las fincas en categorías claramente definidas. El Indicador debe permitir: identificar, interpretar y evaluar variables como calidad del producto, número de trabajadores, capacitación, creación y cualificación de empleo, calidad del empleo, generación de ingresos, diversificación de fuentes de ingresos, tenencia de la tierra, valor de la propiedad, salud ambiental y personal, seguridad alimentaria, además de seguridad y salud ocupacional a nivel socioeconómico y a nivel ambiental las variables asociadas a la fertilidad de suelos, a las funciones hídricas, a la estabilidad de los suelos, biodiversidad (macro-fauna), control climático (regulación de emisiones, carbono en biomasa aérea de los cultivos y almacenamiento de carbono), servicios Eco-sistémicos en los diferentes sistemas de uso. Con el fin último de proponer alternativas de manejo y uso sostenible de producciones agrícolas frágiles y altamente intervenidas como los de la altillanura Orinoquia Colombiana.

La metodología del indicador de ecoeficiencia es aplicable a cualquier grupo de sitios que necesiten una evaluación metodológica comparativa. Sin embargo, pueden existir problemas en la selección de las variables cuando el indicador tiene que responder a una gran diversidad de objetivos. Por ejemplo, la comparación de la eficiencia de diferentes técnicas en un intento de rehabilitar los suelos degradados, evaluar los efectos de los

diferentes sistemas de uso del suelo, las funciones ecológicas o la evaluación de una política general de recursos naturales y la protección de la biodiversidad (Velásquez et al., 2007).

Para la construcción de los indicadores, se utilizó la metodología general propuesta por Velásquez et al, 2007). Un análisis multivariado de cada tabla de datos usada para un determinado sub indicador (por ej. de la calidad física del suelo; de la biodiversidad o de la composición del paisaje de la finca) permite identificar las variables que más separan las fincas o las parcelas, y con estos se construye un sub indicador cuyo valor se ajusta a un rango de 0,1 a 1,0.

Se usa el análisis de Componentes Principales (ACP) cuando se trata de datos cuantitativos, o Análisis en Componentes Múltiples (ACM) cuando se trata de variables multicualitativas, como son las socioeconómicas en su mayoría. Cuando se tiene una mezcla de variables cuantitativas y cualitativas, las cuantitativas se transforman en categorías, por ej. La edad del agricultor, si es menos de 30 años es categoría 1, si es de 30 a 40, categoría 2 etc...

Hicimos también análisis de cluster sobre las coordenadas obtenidas en los análisis multivariados para hacer tipologías. Usamos test de Monte Carlo, también sobre las coordenadas de las fincas para ver si la categorización probada, por ej. el tipo de cobertura o el tipo de sistema de producción, da una separación significativa entre los grupos de fincas (Manly, 2006; Muro Orozco, 2003).

Para la construcción del indicador de ecoeficiencia se siguieron cuatro etapas: (i) el análisis de ACP y/o ACM de cada uno de los grupos de variables, (ii) la identificación de las variables que mejor diferencian los sistemas de producción, (iii) la formación de subindicadores para cada grupo de variables, con valores entre el rango 0.10 a 1.00; (iv) la combinación de los subindicadores en un indicador general de ecoeficiencia. Velásquez et al (2007), explican en profundidad la secuencia metodológica para la

construcción de un indicador multifuncional de calidad de suelos, similar al indicador propuesto en ésta investigación.

Para cada uno de los 4 grupos de las variables: regulación hídrica, fertilidad química, biodiversidad y regulación climática, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) y análisis de correspondencia múltiple (ACM) para el grupo de variables asociadas a la caracterización socioeconómica, al igual que un análisis discriminante para todos los grupos de variables. Los análisis fueron realizados mediante el programa R. El ACP reduce los datos y construye combinaciones lineales que explican gran parte de la variabilidad original. El análisis discriminante permite la operación de la distancia matemática entre los sistemas de producción (Distancia de Mahalanobis). Este análisis usa una prueba de permutación que calcula la inercia total interclase para cada distribución al azar de los individuos dentro de los grupos. El análisis de coinerencia fue llevado a cabo para probar la significancia de covariación entre los cinco grupos de datos i) regulación hídrica; ii) fertilidad química de suelo; iii) biodiversidad (macrofauna); iv) regulación climática (flujo de gases efecto invernadero y el almacenamiento de carbono) y v) caracterización socioeconómica.

Finalmente, la covariación entre dos tablas de datos, que permite saber si por ej. Si las variaciones en las comunidades de macrofauna están ligados a modificaciones en la estructura física, fue realizada con un análisis de coinerencia que calcula el coeficiente de correlación matricial RV, evalúa su significancia y luego proyecta los elementos de ambas tablas en un espacio factorial común, lo que permite ver cuales variables y cuales fincas están más asociados. Estos análisis se hicieron con el programa R usando la librería ade4 (Dray y Dufour, 2007).

7.Resultados.

El Indicador general de ecoeficiencia para cada uno de los sistemas de producción fue construido siguiendo una secuencia de cinco pasos.

Paso 1: Probar la habilidad de los grupos de variables para separar de manera significativa los sistemas de producción mediante un análisis de componentes principales (ACP) y/o análisis de componentes múltiples (ACM).

Los resultados se presentan en el siguiente orden:

(i) Servicios ecosistémicos del suelo

- Fertilidad Química de Suelos
- Regulación hídrica
- Biodiversidad de comunidades de macroinvertebrados
- Estabilidad de estructural de suelos

(ii) Regulación Climática

- Almacenamiento de carbono
- Emisiones de gases efecto invernadero

(iii) Caracterización socioeconómica

- Tecnología de sistemas de producción
- Diversidad de paisaje en finca
- Capital humano

7.1 Variables Ambientales

Todos los análisis de las variables ambientales se realizaron en 41 fincas correspondientes a cultivos transitorios: maíz (TM), soya (TS), arroz (TA), pradera mejorada (PM) cultivos perennes: caucho (C) y palma de aceite (PA) y áreas con sabana natural (SN).

7.1.1 Variables de Fertilidad Química de suelos:

Los análisis químicos fueron realizados a dos profundidades 0-10cm; 10-20cm. Las variables evaluadas fueron: pH, Materia orgánica (M.O.) Fósforo (P^{+3}), Potasio (K^{+1}), Calcio (Ca^{+2}), Magnesio (Mg^{+2}), Aluminio (Al^{+3}), Sodio (Na^{+1}), Azufre (S^{-2}), Boro (B^{+3}), Hierro (Fe^{+2}), Manganeseo (Mn^{+2}), Cobre (Cu^{+2}), Zinc (Zn^{+2}), Carbono (C^{+2}) CIC y CICE. Las tablas se realizaron con los datos de 0-10 cm (Tabla 5 y Tabla 5a).

El sistema de producción que presentaron los valores mínimos de pH fueron cultivo de caucho (3.86) sabana nativa (4.14) y pasturas mejoradas (4.14) respectivamente mientras que los valores máximos fueron para cultivos transitorios (6.30) y cultivo caucho (6.68). Para la variable de materia orgánica (M.O) los valores mínimos fueron para sabana nativa (1.13 g.Kg^{-1}) y cultivo de caucho (1.55 g.Kg^{-1}) mientras que los valores más altos fueron para los cultivos transitorios (7.17 g.Kg^{-1}) y las pasturas mejoradas (6.72 g.Kg^{-1}).

La sabana nativa presentó el valor mínimo de carbono (C) con (0.66 g.Kg^{-1}) mientras que el valor máximo fue para los cultivos transitorios con (4.37 g.Kg^{-1}). En el caso del nitrógeno se observó que el valor mínimo fue para la sabana nativa con (0.05 g.Kg^{-1}) y el valor máximo fue para las pasturas mejoradas con (0.20 g.Kg^{-1}).

Tabla 5. Estadística descriptiva de las variables asociadas a fertilidad de suelo en los sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y pasturas mejoradas.

	Cultivos Transitorios			Sabana Nativa			Pasturas Mejoradas		
	M	R	DS	M	R	DS	M	R	DS
pH	5.03	(4.35-6.30)	0.37	4.68	(4.14-5.27)	0.38	4.78	(4.14-5.64)	0.32
MO g.Kg ⁻¹	4.27	(2.42-7.17)	0.91	3.39	(1.13-5.6)	0.84	4.69	(2.22-6.72)	0.91
C g.Kg ⁻¹	2.48	(1.41-4.17)	0.53	1.97	(0.66-3.25)	0.49	2.72	(1.29-3.90)	0.53
N g.Kg ⁻¹	0.12	(0.06-0.19)	0.02	0.10	(0.05-0.16)	0.01	0.14	(0.07-0.20)	0.02
C:N	20.98	(13.7-55.28)	1.59	19.77	(12.82-24.42)	1.58	20.39	(17.19-24.16)	1.60
P Bray II mg.Kg ⁻¹	27.85	(0.86-113.01)	16.53	3.00	(0.27-44.26)	16.85	4.50	(0.62-30.79)	16.69
K mg.Kg ⁻¹	0.21	(0.03-0.45)	0.07	0.06	(0.02-0.16)	0.07	0.09	(0.02-0.30)	0.07
Ca mg.Kg ⁻¹	2.61	(0.08-5.85)	1.02	0.36	(0.07-3.02)	1.04	0.75	(0.03-3.94)	1.02
Mg mg.Kg ⁻¹	0.97	(0.04-2.03)	0.37	0.14	(0.03-0.85)	0.37	0.30	(0.03-1.41)	0.37
Al mg.Kg ⁻¹	0.99	(0-3.25)	0.86	1.86	(0.3-4.2)	0.86	1.91	(0.00-3.60)	0.84
CIC cmol.Kg ⁻¹	11.12	(4.4-19.82)	2.60	8.04	(2.8-16.1)	2.59	10.48	(3.30-19.70)	2.64
CICE cmol.Kg ⁻¹	4.78	(1.47-8.09)	1.14	2.41	(0.84-6.38)	1.15	3.06	(0.96-5.38)	1.13
Al Sat1 %	25.26	(0-92.18)	26.82	79.23	(12.11-94.88)	27.40	65.82	(0.00-92.86)	26.08
Al Sat2 %	9.45	(0-34.00)	11.84	24.86	(3.54-38.71)	12.14	19.31	(0.00-37.74)	11.75
S mg.Kg ⁻¹	21.48	(8.06-49.82)	7.17	14.94	(0-27.84)	7.29	15.79	(7.09-29.37)	7.19
B mg.Kg ⁻¹	0.40	(0.1-0.69)	0.10	0.25	(0.02-0.51)	0.10	0.31	(0.12-0.46)	0.10
Fe mg.Kg ⁻¹	54.14	(8.02-395.26)	57.90	44.25	(18.4-336.32)	56.53	62.39	(15.03-227.27)	57.22
Mn mg.Kg ⁻¹	6.28	(0.69-27.22)	2.93	1.72	(0.45-8.17)	2.99	4.57	(0.63-23.36)	3.08
Cu mg.Kg ⁻¹	0.67	(0.13-1.52)	0.24	0.34	(0.06-1.05)	0.23	0.64	(0.24-2.34)	0.24

Zn mg.Kg⁻¹ **3.13** (0.35-10.04) 1.36 **0.86** (0.19-12.63) 1.37 **1.42** (0.26-6.43) 1.36

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

Tabla 5a. Estadística descriptiva de las variables asociadas a fertilidad de suelo en los sistemas de producción: Cultivos de palma y Cultivo de caucho

	Cultivos de Palma Aceite			Cultivos de Caucho		
	M	R	DS	M	R	DS
pH	4.64	(4.03-5.50)	0.28	4.91	(3.86-6.68)	0.37
MO g.Kg ⁻¹	3.65	(1.71-6.60)	0.67	3.46	(1.55-5.22)	0.91
C g.Kg ⁻¹	2.12	(0.99-3.84)	0.39	2.01	(0.90-3.03)	0.53
N g.Kg ⁻¹	0.11	(0.06-0.17)	0.01	0.11	(0.08-0.17)	0.02
C:N	20.47	(17.61-35.72)	1.34	19.69	(12.59-23.36)	1.59
P Bray II mg.Kg ⁻¹	4.73	(0.61-57.72)	21.04	10.32	(0.49-143.37)	16.53
K mg.Kg ⁻¹	0.08	(0.02-0.31)	0.06	0.08	(0.01-0.26)	0.07
Ca mg.Kg ⁻¹	0.38	(0.07-2.18)	0.75	1.11	(0.10-3.79)	1.02
Mg mg.Kg ⁻¹	0.16	(0.04-0.83)	0.28	0.38	(0.07-1.38)	0.37
Al mg.Kg ⁻¹	2.00	(0.00-4.20)	0.76	1.48	(0-4.00)	0.86
CIC cmol.Kg ⁻¹	8.03	(1.70-13.00)	2.34	8.97	(2.89-14.70)	2.60
CICE cmol.Kg ⁻¹	2.62	(0.72-4.44)	0.91	3.04	(1.12-6.24)	1.14
Al Sat1 %	73.37	(0.00-94.55)	22.17	50.23	(0-92.23)	26.82
Al Sat2 %	28.76	(0.00-200)	13.33	16.85	(0-62.22)	11.84
S mg.Kg ⁻¹	11.64	(0.00-34.57)	5.88	12.68	(1.11-29.89)	7.17
B mg.Kg ⁻¹	0.29	(0.07-0.64)	0.09	0.30	(0.03-0.54)	0.10
Fe mg.Kg ⁻¹	46.82	(18.9-241.7)	22.35	73.88	(10.52-528.45)	57.90

Mn mg.Kg ⁻¹	2.22	(0.32-8.57)	1.75	2.96	(0.55-12.8)	2.93
Cu mg.Kg ⁻¹	0.42	(0.09-1.68)	0.22	0.35	(0.09-0.84)	0.24
Zn mg.Kg ⁻¹	0.99	(0.31-6.01)	1.18	0.87	(0.26-3.50)	1.36

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

El cultivo del caucho es el que presentó el valor mínimo en la relación carbono/nitrogeno con (12.59 g.Kg⁻¹) y el valor máximo fue para los cultivos transitorios con (55.28 g.Kg⁻¹); En el caso del fósforo, la sabana nativa mostró que el valor mínimo fue (0.27 mg.Kg⁻¹) y el valor máximo fue para los cultivos transitorios con (143.37 mg.Kg⁻¹); Para el potasio, el cultivo del caucho presentó el valor mínimo con (0.01 mg.Kg⁻¹) y el valor máximo fue para los cultivos transitorios con (0.45 mg.Kg⁻¹).

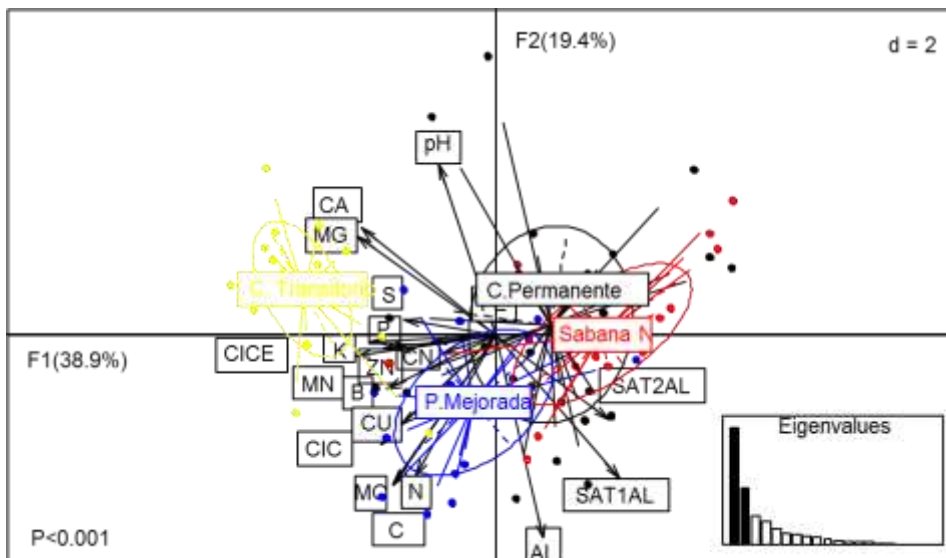
El sistema de pasturas mejoradas obtuvo el valor mínimo más bajo de calcio con (0.03 mg.Kg⁻¹) y el valor máximo con (5.85 mg.Kg⁻¹) fue para los sistemas de cultivos transitorios. En el caso del magnesio, la sabana nativa y los sistemas de pastos mejorados presentaron el valor mínimo más bajo (0.03 mg.Kg⁻¹), mientras que los valores máximos fueron (2.03 mg.Kg⁻¹) para los sistemas de cultivos transitorios.

Para el aluminio todos los sistemas coinciden en tener el mismo valor mínimo (0.0 mg.Kg⁻¹) y la sabana nativa y el sistema de cultivo de la palma presentaron los valores máximos (4.20 mg.Kg⁻¹) más altos. En el caso de la CIC y la CICE, el sistema del cultivo de palma de aceite presenta los valores mínimos más bajos (1.70 cmol.Kg⁻¹ y 0.72 cmol.Kg⁻¹) mientras que el sistema de cultivo transitorio presenta los valores máximos más altos (19.82 cmol.Kg⁻¹ y 8.09 cmol.Kg⁻¹).

En los elementos menores azufre, boro, hierro, manganeso, cobre y zinc se observó que los valores mínimos (0.00 mg.Kg⁻¹; 0.02 mg.Kg⁻¹; 8.02 mg.Kg⁻¹; 0.32 mg.Kg⁻¹; 0.06 mg.Kg⁻¹ y 0.19 mg.Kg⁻¹) respectivamente, corresponde a la sabana nativa, mientras que los valores máximos (49.82 mg.Kg⁻¹; 0.69 mg.Kg⁻¹; 528.45 mg.Kg⁻¹; 27.22 mg.Kg⁻¹; 2.34 mg.Kg⁻¹ y 12.63 mg.Kg⁻¹) respectivamente, corresponden al sistema de cultivos transitorios.

El primer factor de ACP explica el 38.9% de la variabilidad total y separa de forma significativa ($p < 0.001$) los sistemas de uso (Figura 17) cultivos transitorios y pastura mejorada con la mayor fertilidad química. El factor dos separa los sistemas en función del pH alto para algunos cultivos permanentes, del mismo modo alta saturación de aluminio para la sabana nativa y algunos cultivos permanentes.

Figura 17. Proyección de las variables del Subindicador de fertilidad química de suelo en los sistemas de producción basada en los dos primeros factores del ACP de 0-10 cm de profundidad (pH: potencial de hidrogeno; CA: Calcio; MG: Magnesio; S: Azufre; P: Fósforo; K: Potasio; CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva; MN: Manganeseo; B: Boro; ZN: Zinc; CN: Relación Carbono Nitrogeno; CU: Cobre CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; MO: Molibdeno; N:Nitrogeno; C: Carbono; AL: Aluminio; SAT1AL: Saturación de Aluminio con CIC; SAT2AL: Saturación de Aluminio con CIC; C. Permanente: Cultivos Permanentes; C. Transitorio: Cultivos Transitorios; Sabana N.: Sabana Natural; P. Mejorada: Pasturas Mejoradas).



7.1.2 . Funciones Hídricas.

Las funciones hídricas del suelo se midieron a través de 13 variables: Densidad aparente-DA, estabilidad de agregados (Diámetro ponderado medio-DPM), capacidad de

almacenamiento de agua (Agua disponible-ADS, Saturación-SAT, Capacidad de campo-CC y Punto de marchitez permanente-PMP), porosidad total-POROS y su distribución (Macroporos-MACRO, Mesoporos-MESO, y Microporos-MICRO), Arenas-A %, Limos-L %, y Arcillas-AR % (Tabla 6 y Tabla 6a).

La sabana nativa presenta los valores mínimos en las variables humedad gravimétrica (12,7 g.100 g⁻¹) y humedad volumétrica (20.0 cm³.100 cc³), agua disponible (1.92 %), macroporos (3.09 %), mesoporos (3.15 %), diámetro medio ponderado (2.62 mm), arena (21.5 %) y limo (11.3 %).

Tabla 6. Estadística descriptiva de las variables asociadas a la regulación hídrica socioeconómica en los sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y Pasturas mejoradas.

Parámetros	Cultivos Transitorios			Sabana Nativa			Pasturas Mejoradas		
	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***
Humedad, G g.100 g ⁻¹	35.09	25.33 - 48.00	7.17	31.32	12.7 - 42.3	7.11	34.93	30.67 - 40.67	7.12
Humedad, V cm ³ .100 cc ³	50.09	30.00 - 76.67	10.61	46.0	20.0 - 60.0	10.55	50.20	34.67 - 58.00	10.61
D. Aparente g.cm ³	1.42	1.09 - 1.67	0.12	1.49	1.26 - 1.66	0.12	1.44	1.11 - 1.63	0.12
Agua disp. %	5.07	3.60 - 8.44	1.93	5.28	1.92 - 7.15	1.97	4.93	3.05 - 7.24	1.91
Macroporos %	8.00	3.92 - 16.77	3.20	8.11	3.09 - 15.63	3.42	6.29	3.36 - 11.68	3.22
Mesoporos %	7.74	4.74 - 17.71	2.87	8.44	3.15 - 13.65	2.91	6.76	4.22 - 10.92	2.88
Microporos %	32.19	14.94 - 43.09	6.61	30.94	15.4 - 38.7	6.42	33.75	23.3 - 40.82	6.52
Porosidad %	47.96	30.00 - 59.33	5.39	47.50	39.7 - 57.0	5.42	46.87	38.3 - 55.0	5.34
DMP mm	4.44	3.03 - 5.63	0.99	4.20	2.62 - 5.41	0.99	4.58	2.80 - 6.05	1.00
Arena %	39.76	28.83 - 58.83	15.40	49.85	21.5 - 81.3	15.42	45.51	30.8 - 63.1	15.42
Limo %	32.65	20.00 - 46.00	10.26	28.49	11.3 - 45.2	10.52	31.63	20.4 - 49.4	10.56

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

Mientras que el sistema de cultivos transitorio presenta los valores máximos en las variables humedad gravimétrica (48.00 g.100 g⁻¹) y humedad volumétrica (76.67 cm³.100 cc³), densidad aparente (1.67 g.cm³), macroporos (16.77 %), Mesoporos (17.71 %), microporos (43.09 %) y poros (59.33 %)

Tabla 6a. Estadística descriptiva de las variables asociadas a la regulación hídrica en los sistemas de producción: Cultivos de palma de aceite y Cultivos de caucho.

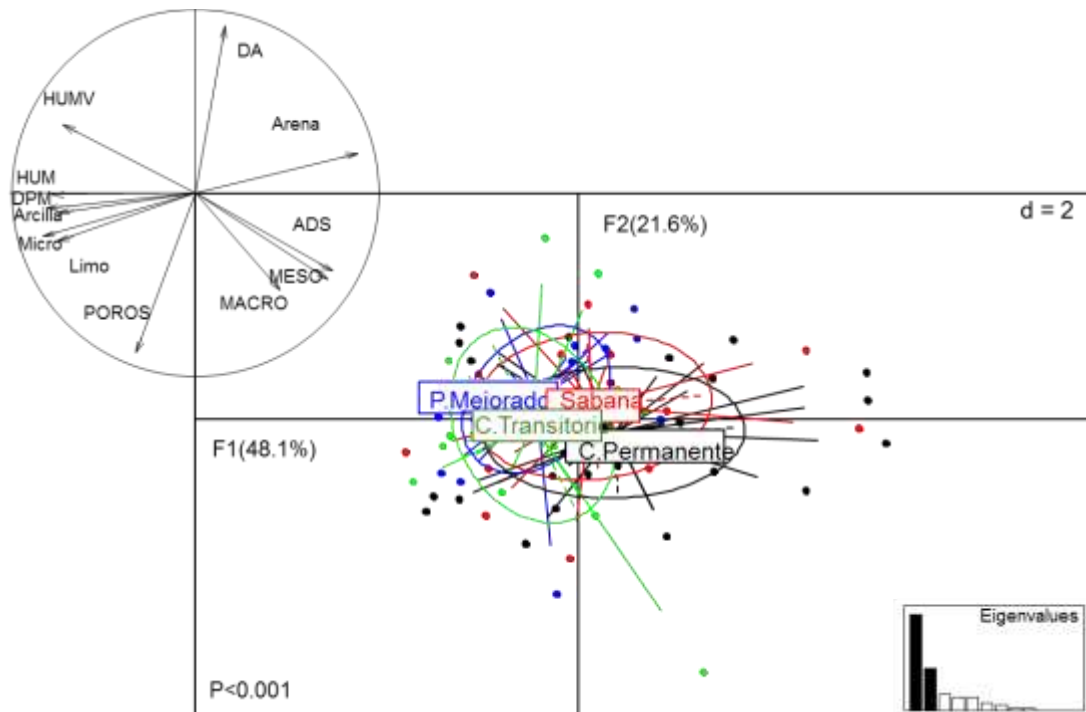
Parámetros		Cultivos de Palma de Aceite			Cultivos de Caucho		
		M*	R**	DS***	M*	R**	DS***
Humedad, G	g.100 g ⁻¹	34.93	30.67 - 40.67	7.56	34.77	23.33 - 44.33	6.92
Humedad, V	cm ³ .100 cc ³	50.2	34.67 - 58.00	11.53	47.23	34.0 - 58.0	10.28
D. Aparente	g.cm ³	1.44	1.11 - 1.63	0.08	1.37	1.24 - 1.57	0.12
Agua disp.	%	4.93	3.05 - 7.24	2.15	6.45	3.00 - 8.89	1.93
Macroporos	%	6.29	3.36 - 11.68	2.92	8.90	5.12 - 15.31	3.35
Mesoporos	%	6.76	4.22 - 10.92	2.93	9.00	3.76 - 12.64	2.87
Microporos	%	33.75	23.3 - 40.82	5.45	31.65	23.5 - 42.71	6.42
Porosidad	%	46.87	38.33 - 55.00	3.88	49.56	41.0 - 56.0	5.27
DMP*	Mm	4.58	2.8 - 6.05	1.04	4.57	2.75 - 6.03	0.99
Arena	%	45.51	30.79 - 63.07	15.25	48.41	23.50 - 72.29	15.35
Limo	%	31.63	20.43 - 49.38	10.52	30.20	13.87 - 49.33	10.31

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

El primer factor del ACP (48.1%) separa los suelos de mejor calidad física, en los sistemas de uso pasturas mejoradas y cultivos transitorios, estos presentaron mayor capacidad de almacenamiento de agua, mayor porcentaje de arcillas y mayor estabilidad de agregados (figura 18).

El factor dos explica el 21.6% de la variabilidad total y opone los suelos con mayor densidad aparente de aquellos con mayor porosidad.

Figura 18. ACP de las variables físicas: DA: densidad aparente; HUMV: humedad volumétrica; HUM: humedad gravimétrica; DPM: diámetro ponderado medio – Estabilidad de Agregados; ADS: agua disponible – capacidad de almacenamiento de agua (Saturación – SAT, Capacidad de campo – CC – Punto de marchitez permanente – PMP), texturas: (Arcilla – Limo – Arena), poros: Porosidad (Macro – meso – micro)



7.1.3 . Biodiversidad (macrofauna del suelo).

Se colectaron invertebrados de 16 órdenes que después se redujeron en 7 grupos después de agrupar los invertebrados de funciones cercanas y con abundancias mínimas.

En las Tabla 7 y Tabla 7a. Se observó que todas las variables asociadas a biodiversidad en los suelos evaluados el valor mínimo encontrado es de (0,00 individuos), mientras que

el sistema de pastos mejorados es el que aloja la mayor población y diversidad de individuos, con un valor máximo encontrado así: lombrices endógeas (507 individuos); termitas (7856 individuos); coleópteros (352 individuos); miriápodos (117 individuos) y otros invertebrados (635 individuos).

Tabla 7. Estadística descriptiva de las variables asociadas a biodiversidad de macroinvertebrados en suelos en sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y Pasturas mejoradas.

Parámetros	Cultivos transitorios			Sabana nativa			Pasturas mejoradas		
	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***
Lombrices endógenas	25.96	0 - 101	17.25	56.90	0 - 192	12.10	156.09	0 - 507	17.15
Lombrices epigeas	1.42	0 - 10	2.21	3.20	0 - 213	2.36	1.78	0 - 69	2.48
Termitas	211.20	0 - 2800	391.24	1282.00	5 - 4661	354.32	2939.0	133 - 7856	388.57
Hormigas	271.64	0 - 2325	91.05	723.56	5 - 1888	96.55	411.38	43 - 869	89.70
Coleópteros	25.60	0 - 187	11.45	79.29	5 - 219	11.35	107.73	21 - 352	11.28
Miriápodos	32.36	0 - 117	5.30	9.24	0 - 43	4.32	24.53	0 - 117	4.81
Otros invertebrados	50.49	0 - 181	17.18	70.40	5 - 229	11.20	136.18	11 - 635	17.03
Observación de hojarasca	7.30	2 - 11	2.58	8.90	6 - 15	2.42	10.70	7 - 15	2.54

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

La sabana nativa presenta los valores máximos de lombrices epigeas (213 individuos) y observación de hojarasca (15 individuos), mientras que en el sistema de cultivos transitorios se observó los valores máximos de hormigas con 2325 individuos.

Tabla 7a. Estadística descriptiva de las variables asociadas a biodiversidad de macroinvertebrados en suelos en sistemas de producción: Cultivos de palma de aceite y Cultivos de caucho

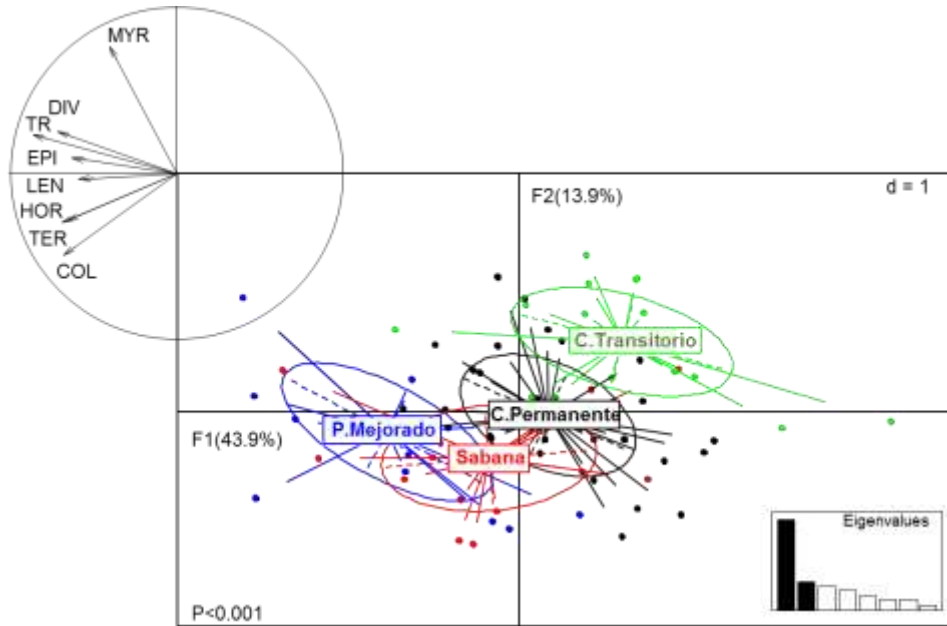
Parámetros	Cultivos palma de aceite			Cultivos de caucho		
	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***
Lombrices endógenas	35.91	0 - 85	14.83	40.18	0 - 75	16.65
Lombrices epigeas	1.42	0 - 11	2.74	2.49	0 - 27	24.13
Termitas	2022.00	59 - 5989	387.19	1540.0	0 - 6992	385.04
Hormigas	247.47	11 - 704	78.62	196.98	0 - 1136	93.67
Coleópteros	45.51	11 - 133	12.00	29.16	5 - 59	11.05
Miriápodos	16.00	0 - 43	4.54	18.13	0 - 75	5.11
Otros invertebrados	25.96	5 - 80	8.54	45.51	0 - 165	16.55
Observación de hojarasca	8.50	5 - 12	2.34	8.60	6 - 13	2.52

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

Los dos primeros factores del ACP explican el 57.8% de la variabilidad total de los datos y separan en forma significativa ($p < 0.001$) la sabana nativa y los pastos mejorados como los sistemas con mayor abundancia y diversidad de macrofauna del suelo (F1 43.9%).

Los cultivos permanentes y transitorios presentan menor abundancia y diversidad de todos los grupos taxonómicos (Figura 19).

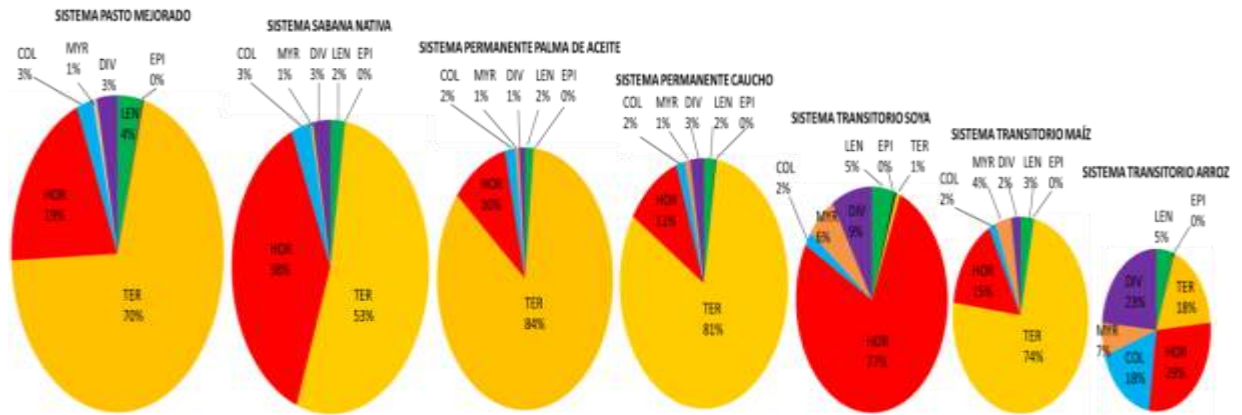
Figura 19. ACP de los diferentes grupos taxonómicos de macrofauna. DIV: diversos invertebrados de la hojarasca; TR: riqueza taxonómica total; EPI: lombrices epigeas; LEN: lombrices endógeas; HOR: Hormigas; TER: termitas; COL: Coleóptera.



En general las termitas fueron los individuos más encontrados con 69% equivalente a 22.727 individuos seguido por las hormigas con 21% que representa 7.015 organismos, con un 3% se presentaron los animales de la hojarasca (935), las lombrices endógeas (892) y los coleopteros (816) continuando con los myriapodos (chilopodo y diplopodo) con el 1% que constituyen 282 especímenes y por último las lombrices epigias equivalente a 74 individuos, para un total de 33.412 individuos observados.

La figura 20 muestra la composición abundancia y diversidad) de macrofauna del suelo en los diferentes sistemas de uso.

Figura 20. Composición y abundancia de la macrofauna del suelo en los diferentes sistemas de uso mostrando una disminución progresiva desde las pasturas mejoradas hacia la sabana nativa, los cultivos permanentes y los anuales. El tamaño de los círculos es proporcional a la densidad total



7.1.4 . Estabilidad estructural del suelo.

Se evaluó la estabilidad estructural del suelo por medio de la agregación encontrada en cada suelos evaluados así: Agregados físicos, de raíz, biogénicos, suelo no agregado, material vegetal y piedras (Tabla 8, Tabla 8a).

La sabana nativa y el sistema de pasturas mejoradas tiene los valores mínimos de agregados físicos (51g) y valores máximos de agregados biogénicos (779 g); material vegetal (24.2 g) y piedras (84 g).

Tabla 8. Estadística descriptiva de las variables asociadas a estabilidad estructural en suelos en sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y pasturas mejoradas

Parámetros	Cultivos transitorios			Sabana nativa			Pasturas mejoradas		
	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***
Agregados físicos	49.31	299 - 695	200.55	9.85	51 - 146	197.19	12.78	53.8 - 183	198.77
Agregados de raíz	0.24	0.0 - 15.9	2.53	0.15	0.0 - 3.0	2.48	0.26	1.1 - 4.4	2.48
Agregados biogénicos	13.91	59.7 - 476	243.96	48.29	91 - 779	248.53	56.57	467 - 772	247.95
Suelo no agregado	35.75	105 - 479	169.3	40.38	226 - 861	168.6	29.52	141 - 456	168.45
Material vegetal	0.70	2.9 - 22.3	5.82	0.68	3.5 - 24.2	5.76	0.86	3.4 - 12.9	5.76
Piedras	0.09	0.0 - 12.9	11.78	0.63	0.0 - 84	11.61	0.00	0.00 - 0.00	11.53

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

El sistema de cultivo transitorio tiene los valores mínimos de suelo sin agregar (105 g) y los valores máximos de agregados físicos y agregados de raíz.

El sistema de cultivo de la palma de aceite tiene los valores mínimos de agregados biogénicos y el sistema de cultivo de caucho tiene los valores mínimos de material vegetal.

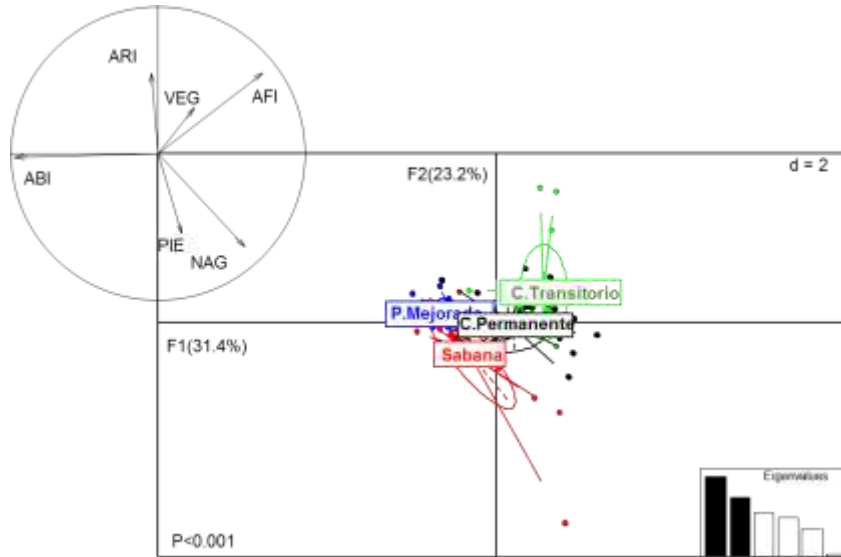
Tabla 8a. Estadística descriptiva de las variables asociadas a estabilidad estructural en suelos en sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y pasturas mejoradas

Parámetros	Cultivos Palma de aceite			Cultivos de caucho		
	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***
Agregados físicos	40.05	189 - 629	175.4	15.26	75 - 337	193.75
Agregados de raíz	0.12	0.0 - 2.3	1.12	0.12	0 - 5.5	2.43
Agregados biogénicos	13.36	43.7 - 250	262.35	44.25	47 - 633	245.3
Suelo no agregado	45.27	214 - 774	155.92	39.64	188 - 565	165.08
Material vegetal	1.20	3.8 - 21.7	6.64	0.74	2.8 - 20.5	5.64
Piedras	0.00	0.0 - 0.0	0.00	0.00	0.0 - 0.0	11.14

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

El ACP separó de forma altamente significativa ($p < 0.001$) los sistemas de uso del suelo en función de su morfología. El factor 1 (31.4%) separa los sistemas sabana nativa y pastos mejorados como los sistemas con mayor cantidad de agregados biogénicos, producto de la actividad de los ingenieros del ecosistema (lombrices, termitas y hormiga). El factor 2 (23.2%) separa los cultivos transitorios con mayor abundancia de agregados físicos del suelo, formados cuando el suelo no presenta cobertura vegetal y está más expuesto al sol y al impacto de la lluvia (Figura 21), Los sistemas cultivo de palma de aceite y cultivo de caucho, conservan condiciones intermedias de agregados de raíz, agregados biogénicos y material vegetal.

Figura 21. ACP de la Estabilidad estructural del suelo entre los sistemas de uso Sabana natural; Pastizal mejorado; Cultivos permanentes (caucho; palma de aceite) y Cultivos Transitorios (arroz; soya y maíz).



7.1.5 Regulación climática por los diferentes tipos de uso del suelo

Se midieron los contenidos de C y N en el suelo (0-20 cm), se calcularon a partir de las emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O en 4 épocas, teniendo en cuenta la densidad aparente del suelo en cada sitio (Tabla 9 y Tabla 9a).

En el sistema de cultivos transitorios se encontró valores mínimos de metano almacenado ($-529 \text{ mg m}^{-2} \cdot \text{r}^{-1}$) y emitido ($-0.04 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{r}^{-1}$) a la atmósfera, y valores máximos de óxido nítrico almacenado ($11768 \text{ mg m}^{-2} \cdot \text{r}^{-1}$) y emitido ($3.40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{r}^{-1}$), mientras que la sabana nativa presentó los valores mínimos ($0.03 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{r}^{-1}$) para la variable de CO_2 emitido y se observó valores máximos ($0.11 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{r}^{-1}$) de metano emitido a la atmósfera.

El sistema de pastura mejorada mostró valores máximos de carbono almacenado en el suelo ($92.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$), metano almacenado ($1565 \text{ mg m}^{-2} \cdot \text{y r}^{-1}$) y emitido ($0.11 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{y r}^{-1}$).

Tabla 9. Estadística descriptiva de las variables asociadas a la regulación climática (almacenamiento de C en la biomasa, suelos y CO_2) y emisiones de gases a efecto de invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O) en suelos en sistemas de producción: Cultivos transitorios, Sabana nativa y pasturas mejoradas

Parámetro	Cultivos transitorios			Sabana nativa			Pasturas mejoradas		
	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***	M*	R**	DS***
C en Biomasa Mg C ha^{-1}	1.74	0.47-4.49	28.96	2.50	0.63-4.13	15.86	2.57	1.15-3.95	31.50
C en Suelo Mg C ha^{-1}	60.29	30.7-74.5	19.19	52.02	5.45-68.5	11.16	69.80	44.3-92.7	8.37
CO_2 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{y r}^{-1}$	0.20	0.14-0.36	0.10	0.15	0.03-0.26	0.07	0.27	0.15-0.44	0.10
CH_4 $\text{mg m}^{-2} \cdot \text{y r}^{-1}$	-22.92	-529-428	344.83	150.95	-303-1547	270.25	325.03	-108-1565	548.72
$\text{CH}_4 \text{ eq. CO}_2$ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{y r}^{-1}$	0.00	-0.04-0.03	0.02	0.01	-0.02-0.11	0.02	0.02	-0.01-0.11	0.04
$\text{N}_2\text{O eq. CO}_2$ $\text{mg. m}^{-2} \cdot \text{y r}^{-1}$	3015.3	52-11768	1610.6	2096.9	113-8414	3556.5	1441.0	54.5-5232	1825.3
$\text{N}_2\text{O eq. CO}_2$ $\text{kg m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$	0.87	0.02-3.40	0.46	0.61	0.03-2.43	1.02	0.42	0.016-1.51	0.52

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

En el sistema de cultivo palma de aceite se evidenciaron valores mínimos de carbono en el suelo ($29.8 \text{ Mg C ha}^{-1}$) y óxido nitroso almacenado ($13.7 \text{ mg.m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$) y valores máximos de carbono en la biomasa ($113.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$). En el sistema cultivo de caucho se observó valores mínimos de carbono en biomasa ($0.21 \text{ Mg C ha}^{-1}$) y óxido nitroso emitido ($0.14 \text{ kg m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$) a la atmosfera.

Tabla 9a. Estadística descriptiva de las variables asociadas a la regulación climática (almacenamiento de C en la biomasa, suelos y CO₂) y emisiones de gases a efecto de invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O) en suelos en sistemas de producción: Cultivos de palma de aceite y Cultivos de caucho

Parámetros		Cultivos palma de aceite			Cultivos de caucho		
		M*	R**	DS***	M*	R**	DS***
C en Biomasa	Mg C ha ⁻¹	35.30	1.5 - 113.3	15.15	19.28	0.21 - 101.3	1.28
C en Suelo	Mg C ha ⁻¹	53.56	29.8 - 64.8	7.54	52.11	31.9 - 65.7	10.00
CO ₂	kg m ⁻² .y r ⁻¹	0.20	0.11 - 0.37	0.07	0.25	0.11 - 0.52	0.05
CH ₄	mg m ⁻² .y r ⁻¹	168.44	-379 - 1120	434.77	161.25	-274 - 904	278.69
CH ₄ eq.CO ₂	kg/m ² .y r ⁻¹	0.01	-0.03 - 0.01	0.03	0.01	-0.02 - 0.07	0.02
N ₂ O eq.CO ₂	mg. m ⁻² .y r	1142.52	13.7 - 446.6	757.61	1998.85	476 - 6580	1202.73
N ₂ O eq.CO ₂	kg m ⁻² .yr ⁻¹	0.33	0.004 - 0.77	0.21	0.58	0.14 - 1.90	0.34

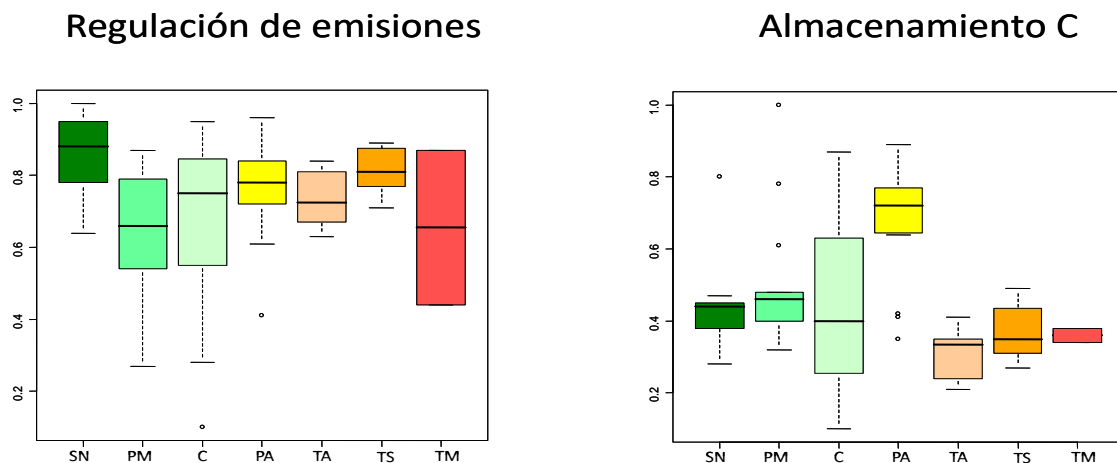
M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

En este caso no se usó la metodología de los análisis multivariados porque resultó complicado mezclar en un solo análisis variables que miden contenidos, (C en suelos y biomasa) y variables que miden flujos (emisiones de gases). Aunque se separaron de forma significativa los sistemas de uso ($p < 0.01$; 20,2% de la varianza explicada por el uso del suelo), los efectos señalados por los ejes resultaron difíciles de interpretar, ya que se encontró, de un mismo lado, variables de emisiones con cantidades de C en el suelo, lo que muestra una tendencia general al aumento de emisiones cuando hay más C en el suelo, pero no la tendencia específica de ciertos tipos de uso a favorecer una mayor emisión por unidad de materia orgánica presente, por lo que se decidió en una primera etapa establecer dos indicadores.

- Un indicador de almacenamiento de C en suelos y biomasa que es la sumatoria de los dos contenidos.
- Un indicador de emisiones de gases a efecto de invernadero que suma el equivalente en C-CO₂ de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O.

En la figura 22, se presenta el comportamiento de estos dos indicadores, los valores obtenidos para el control de emisiones están por encima de 0.6 para todos los usos de suelo, sin embargo, la sabana natural es el sistema con mayor valor, para el caso de almacenamiento de C, la palma de aceite es el sistema con el valor más alto, seguido por la pradera mejorada, la sabana natural y el caucho en su orden, los sistemas transitorios presentaron los menores valores.

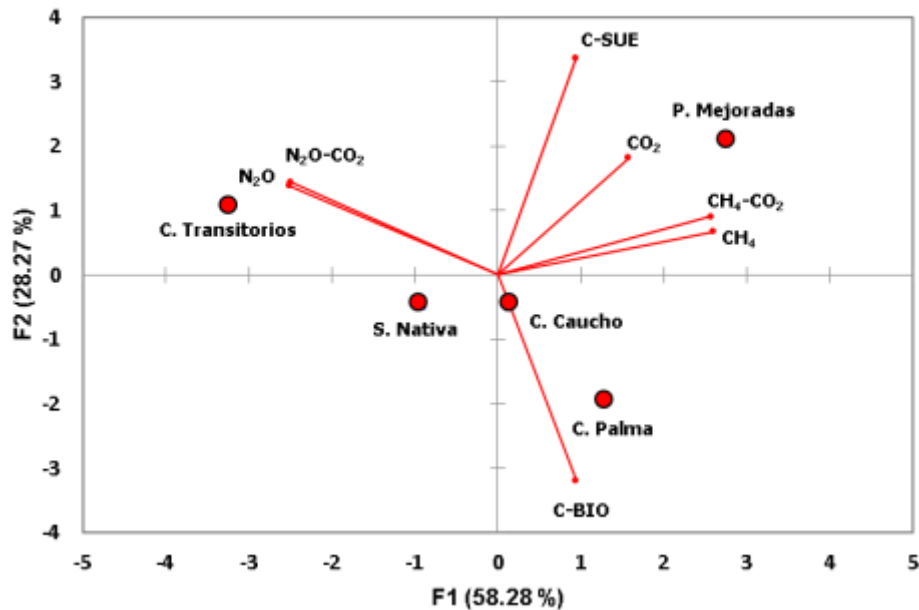
Figura 22. Indicadores asociados a la regulación climática entre los sistemas de uso (SN: sabana natural; PM: Pastizal mejorado; C: caucho; PA: palma de Aceite; TA: Transitorio Arroz; TS: Transitorio Soya; TM: Transitorio Maíz.



El ACP para el grupo de variables de regulación climática (Figura 23) separó significativa ($p < 0.0001$), los sistemas de producción. La proyección en el plano factorial delimitado por los F1 y F2, mostró condiciones contrastantes entre los sistemas con pasturas mejoradas y los cultivos transitorios. Las pasturas mejoradas presentaron mayor almacenamiento de carbono en el suelo y emisiones mayores de CH₄ y CO₂. Los cultivos transitorios

presentaron mayores emisiones de N_2O . El cultivo de palma de aceite mostró el mayor contenido de carbono en biomasa.

Figura 23. La proyección en el plano factorial delimitado por los F1 y F2, mostró condiciones contrastantes entre los sistemas con pasturas mejoradas y los cultivos transitorios. Las pasturas mejoradas presentaron mayor almacenamiento de carbono en el suelo y emisiones mayores de CH_4 y CO_2 .



7.2 . Variables socioeconómicas.

Se utilizaron las encuestas realizadas por el CIAT en 51 fincas ubicadas en 31 veredas de los municipios de Puerto Gaitán (Carimagua) y Puerto López para caracterizar las condiciones socioeconómicas de las fincas. La encuesta conto con 227 preguntas organizadas en 13 bloques así: Identificación del predio (12 preguntas), Información del encuestado (5), Información del productor (11), Información de trabajadores, (4) Historia del predio (11), Aplicación de correctivos al suelo (9), Labranza (14), Fertilización (14), Control de malezas (29), Control de plagas y enfermedades (29), Pastoreo (37), Razones de adopción de nuevos cultivos (5), Capacitación (11) (Anexo 3).

Las áreas de cultivo en las fincas tienen en promedio 792 ha. En el 82% de las fincas aplican correctivos para la acidez del suelo (cal dolomita y roca fosfórica) que incorporan mediante rastra. Todos preparan el suelo con rastra y arado con cincel.

Solo en el 50% de las fincas aplican fertilizantes, de tipo N-P-K-S y N-P-K, urea y Rafos, la mayoría de ellos no llevan más de 6 años usando estos fertilizantes, usan entre 300 y 700 kilos de fertilizante por hectárea.

El 84% hace control de arvenses con un método químico (40%) y con un método mecánico (28%) Este control en su mayoría es de tipo químico, biológico y cultural, usan una amplia gama de productos para control de malezas.

Entre quienes practican la ganadería el método más usual de pastoreo es el alterno (52,5%) y el continuo (19%). En el 26% de los casos la capacidad de carga esta entre 1 y 3 unidades. El 41,67% no hace renovación de pastos, y solo el 18,33% si lo hace; finalmente la mitad de los encuestados afirmo que la razón por la cual decidieron implementar el cultivo principal que tienen fue expectativa económica (Anexo 3).

Se realizó un análisis previo para eliminar las variables redundantes. Una vez se seleccionaron las variables a incluir en el análisis, se agruparon en tres categorías:

- 1. Capital humano** (indicador social, 5 variables): edad, tenencia de la tierra, trabajadores permanentes hombre y/o mujeres, capacitación recibida;
- 2. Sistema de producción** (indicador económico, 11 variables): aplicación de correctivos químicos, preparación y análisis del suelo, cultivos principales, tipo de labranza, ganadería, control de arvenses, métodos de control, control de plagas, tipos de pastoreo, motivación para cambios de cultivo;

3. Paisaje (composición de la finca, 7 variables): área total, área de cultivos permanentes, área de cultivos temporales, área de sabana nativa, área con pastos, áreas de preservación ambiental, áreas forestales.

Se realizó Análisis de Componentes Múltiples (ACM) para las variables cualitativas (capital humano y sistemas de producción) y Análisis de Componentes Principales (ACP) para las variables cuantitativas (paisaje). Los resultados de los análisis se resumen en la tabla 10.

Tabla 10. Análisis de las variables socioeconómicas

VARIABLES	ANÁLISIS	F1 (%)	F2 (%)	VARIANZA EXPLICADA		TEST MONTECARLO
				F1	F2%	p value*
Capital humano	ACM	22.1	14.9	31.0		0.001
Sistema de producción	ACM	21.9	11.6	31.0		0.001
Paisaje	ACP	25.3	24.0	17.0		0.001

*Test de Montecarlo realizado para la agrupación de fincas separadas por el análisis de clúster.

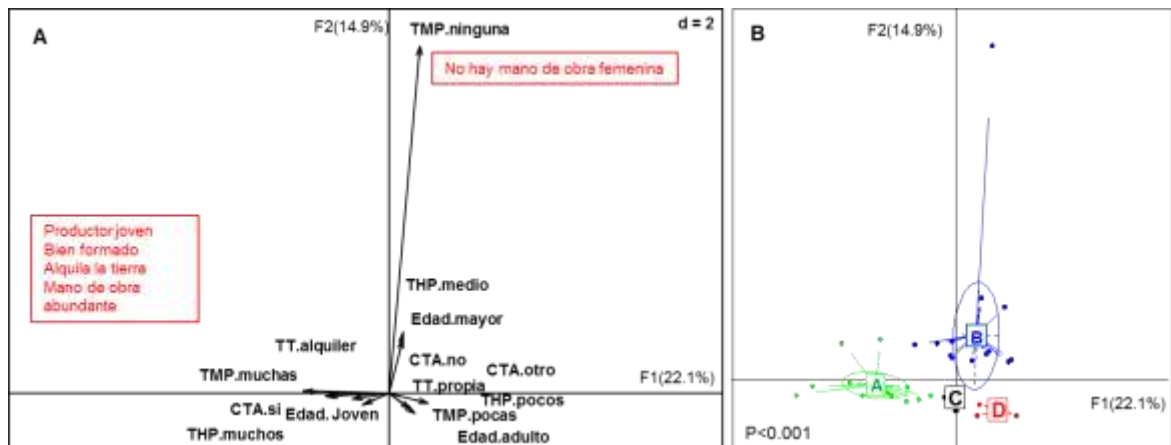
Se presentan a continuación los resultados de los Análisis de Correspondencia Múltiple (ACM) para los grupos de variables Capital humano y Sistema de producción.

7.2.1. Capital humano:

El factor 1 separa los sistemas con productores jóvenes, con formación académica, que alquilan la tierra y emplean muchos hombres y mujeres permanentes, de los sistemas con propietarios de mayor edad que no emplean muchas personas (Figura 24).

El factor 2 separa las fincas en función de la poca mano de obra femenina.

Figura 24. ACM de las variables de capital humano (A). Clúster (B), TMP. ninguna: No emplea mano de obra femenina tiempo completo; THP.medio: Emplea mano de obra masculina tiempo completo; Edad.mayor: propietario mayor; TT.alquiler: Tenencia de la tierra en alquiler; TMP.Muchas: emplea mucha mano de obra femenina tiempo completo; CTA.no: No formación académica; CTA.otro: posee otro tipo de formación; TT.propia: Tenencia de la tierra Propia; CTA.si: Si tienen formación académica; Edad.joven: propietario joven; THP.muchos: Emplea mucha mano de obra masculina tiempo completo; THP.pocos: Emplea poca mano de obra masculina tiempo completo; TMP.pocas: Emplea poca mano de obra femenina tiempo completo Edad.adulto: propietario adulto.



Se realizó un clúster (Figura 24B) el cual separó cuatro grupos de fincas en función de su similitud dada por las variables (Test de Montecarlo $p < 0.001$). De la siguiente manera:

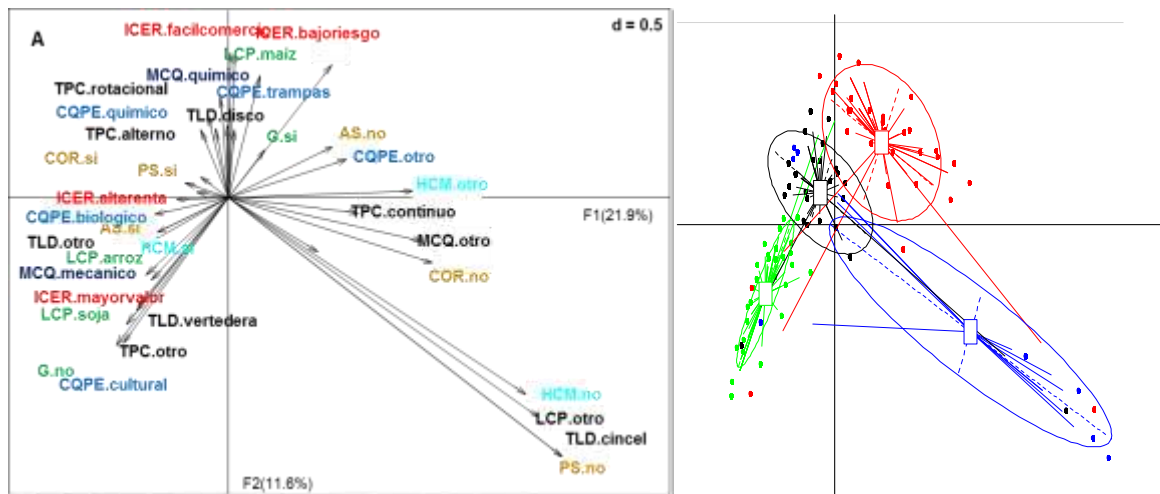
- A: joven productor que alquila la tierra (TT), con formación académica (CTA.si), que emplea mucha mano de obra permanente masculina (THP) o femenina (TMP).
- B: Productor de mayor edad, propietario, sin formación específica, no emplea mujeres.
- C: joven propietario, medio.
- D: adulto, propietario, tiene otro tipo de formación (otro) y no emplea mucho personal.

7.2.2. Sistemas de Producción:

Se realizó el mismo tipo de análisis para los sistemas de producción (Figuras 25). El factor 1 separa los sistemas de producción muy tecnificados (grupos A y C del clúster) con cultivos transitorios (arroz, maíz), que hacen análisis (AS) y preparación del suelo (PS), control de maleza (HCM) y de plagas (CQPE), corrección de suelo (COR), labranza (TLD) y buscan rentabilidad en el momento de invertir en nuevos cultivos (ICER). Del lado opuesto se agrupan los sistemas (B) poco intervenidos, con ganadería y pastoreo continuo (TPC).

El factor 2 separa cultivos de fácil comercio y bajo riesgo, el maíz principalmente, asociado a ganadería (D).

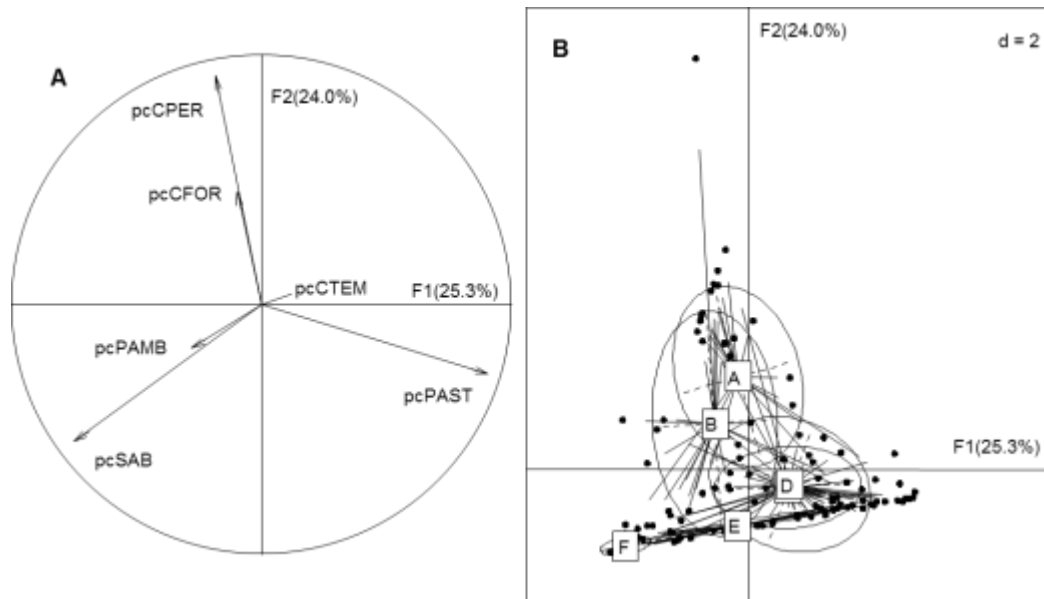
Figura 25. ACM de las variables de Sistemas de producción (A). Clúster (B).
 ICER.facilcomercio: Invierte en cultivos de fácil comercio; ICER.bajoriesgo: Invierte en cultivo de bajo riesgo; LCP.maiz: lote sembrado con maíz; MCQ.químico: realiza control químico de malezas; TPC.rotacional: utiliza pastoreo rotacional; CQPE.trampas: utiliza trampas para control químico de plagas y enfermedades; CQPE.quimico: utiliza control químico de plagas y enfermedades; TLD.disco: utiliza arado de disco; TPC.alterno: utiliza pastoreo alterno; G.si: tiene ganadería establecida; AS.no: no realiza análisis químico de suelos; COR.si: corrige acidez del suelo; PS.si: prepara el suelo antes de la siembra; CQPE.otro: utiliza otro tipo de control para plagas y enfermedades; HCM.otro: realiza otro tipo de control de maleza; ICER.altarenta. Invierte en cultivos de alta rentabilidad; CQPE.biológico: utiliza control biológico para manejo de plagas y enfermedades; As.si: si realiza análisis de suelos; TLD.otro: utiliza otro tipo de labranza; HCM.si: realiza control de maleza; LCP.arroz: lote sembrado con arroz; MCQ.mecánico: realiza control mecánico de malezas; ICER.mayorvalor: Invierte en cultivos de mayor valor; LCP.soja: lote sembrado con soja; TLD.vertedera: utiliza arado de vertedera; TPC.otro: utiliza otro tipo de pastoreo; G.no: no tiene ganadería establecida; CQPE.cultural: utiliza control cultural para manejo de plagas y enfermedades; TPC.continuo: utiliza pastoreo continuo; MCQ.otro: realiza otro tipo de control de malezas; COR.no: no corrige acidez del suelo; HCM.no: no realiza control de maleza; LCP.otro: lote con otros cultivos; TLD.cinzel: utiliza arado de cinzel; Ps.no: no prepara el suelo antes de la siembra.



7.2.3. Paisaje (composición de la finca)

Se realizó un ACP para las variables de composición de la finca. El factor 1 (25.3%) opone paisajes dominados por pasturas (pcPAST) a paisajes con sabana (pcSAB) y zonas de protección ambiental (pcPAMB). El factor 2 (24.0%) opone sistemas con cobertura arbórea sea de cultivos permanentes (pcPER) o bosques (pcFOR) a sistemas herbáceos (Figura 26).

Figura 26. ACP de las variables de Composición del paisaje (A). Clúster (B). pcCPER: paisaje con cultivos permanentes; pcCFOR: paisaje con especies forestales ó bosques; pcCTEM: paisaje con cultivos temporales o transitorios; pcPAMB: paisaje con zonas de protección ambiental; pcPAST: paisaje con pasturas mejoradas; pcSAB: paisaje con sabanas nativas.



El análisis de clúster separó 6 tipos de paisajes: A y B, con plantaciones perenes y bosques; C y D, con pasturas; E con medios herbáceos mixtos; y F con sabana natural y zonas de protección ambiental

Los diferentes tipos de uso del suelo se asociaron significativamente con condiciones de paisaje, de capital humano y de sistemas de producción diferentes (tabla 11).

Tabla 11. Valores de cada Subindicador del componente socioeconómico.

		Sistemas de Producción	Paisajes	Capital Humano
Cultivos Transitorios	M*	0.91	0.24	0.24
	R**	0.72 - 1.00	0.11 - 0.48	0.10 - 0.42
	DS***	0.09	0.14	0.09
Sabana Nativa	M*	0.83	0.16	0.36
	R**	0.64 - 0.97	0.10 - 0.29	0.10 - 0.78
	DS***	0.09	0.06	0.21
Pasturas Mejoradas	M*	0.80	0.16	0.39
	R**	0.51 - 0.97	0.10 - 0.29	0.10 - 0.78
	DS***	0.14	0.07	0.22
Cultivos Permanentes	M*	0.88	0.21	0.46
	R**	0.51 - 0.99	0.10 - 0.42	0.10 - 0.81
	DS***	0.13	0.12	0.28

M*: Media, R**: Rango y DS***: Desviación Estándar.

Se evaluó la covariación entre los tres grupos de variables del componente Socioeconómico a través de un análisis de Coinercia, encontrándose una correlación altamente significativa entre los tres grupos de variables (Tabla 12).

Tabla 12. Análisis de Coinercia entre las variables socioeconómicas.

COINERCIA	TEST MONTECARLO p value*
Capital humano-Sistema de producción	0.001
Capital humano-Paisaje	0.001
Sistema de producción-Paisaje	0.001

*Test de Montecarlo realizado para la agrupación de fincas del clúster.

7.3 . Análisis de Co-inercia

Después de revisar que los 9 grupos de variables, se separaron de manera significativa los sistemas de producción, se ejecutó un análisis de inercia para revisar las relaciones significativas entre grupos de variables con el objeto de entender las relaciones entre variables (Tabla 13).

Tabla 13. Contribución de los factores 1 y 2 al total de la inercia en ACP y ACM, en los grupos de variables asociadas a servicios ecosistémicos, regulación climática y la caracterización socioeconómica en los sistemas de producción.

Grupo	Análisis	% Inercia	
		F1	F2
Servicios ecosistémicos			
Fertilidad química de suelo	ACP*	38.9	19.4
Regulación hídrica	ACP	48.1	21.6
Biodiversidad (macrofauna)	ACP	43.9	13.9
Estabilidad estructural suelo	ACP	31.4	23.2
Regulación climática			
Almacenamiento de Carbono	ACP	58.3	28.3
Gases efecto invernadero			
Caracterización socioeconómico			
Tecnología de sistemas producción	ACM**	21.9	11.6
Diversidad de paisaje en fincas	ACM	25.3	24.0
Capital humano	ACM	22.1	14.9

* ACP: Análisis de componentes principales

** ACM: Análisis de correspondencia múltiple

7.4 . Construcción del Indicador de Ecoeficiencia

Para la construcción del Indicador de Ecoeficiencia se creó un subindicador para cada grupo de variables analizada anteriormente:

- (i) Componente social: el indicador de capital humano;
- (ii) Componente ambiental: suma de los sub indicadores de Fertilidad química; Funciones hídricas; Biodiversidad; Regulación climática; Estabilidad estructural del suelo.
- (iii) Componente económico. el indicador de Sistema de producción.

Los subindicadores tienen valores que oscilan entre 0.10 y 1.00. Posteriormente se sumaron estos subindicadores en un indicador de ecoeficiencia, siguiendo el procedimiento explicado en el artículo Velásquez et al (2007).

Paso 2 y 3: Selección de variables relevantes y formación de los subindicadores

Para cada análisis de componentes principales de los grupos de variables (Fertilidad química, Regulación hídrica, Biodiversidad de comunidades de macroinvertebrados, Estabilidad estructural de suelos, Regulación climática: (Almacenamiento de carbono, Emisiones de gases efecto invernadero), Caracterización socioeconómica: (Tecnología de sistemas de producción, Diversidad de paisaje en finca, Capital humano)), se seleccionaron las variables que presentaron peso en el eje 1 y eje 2, al menos igual o equivalente a la mitad del valor máximo respectivamente, calculados para los ejes que fueron seleccionado. Algunas variables que cumplieron estas condiciones fueron eliminadas cuando estuvieron altamente correlacionadas con otras variables difíciles o costosas de medir, por consiguiente, redundantes.

Cada uno de los nueve subindicadores (SI_e , 1,9) de ecoeficiencia, en el sistema de producción (i) es la suma del número (n) de variables seleccionadas ($v_1, ..v_n$) multiplicado por su respectivo peso determinados en los ejes 1 y 2 ($w_1,..w_n$), así:

$$SI_{e 1,6} = wv_1 + wv_2 + \dots + wv_n$$

Cuando se calculan los subindicadores, se reduce los valores de las variables a un rango común entre 0.1 y 1.0 mediante una transformación homotética:

$$Y = 0.1 + ((x-b)/(a-b)) \times 0.9$$

Donde Y es el valor de la variable después de la transformación; x, la variable a transformar; a, el máximo valor de la variable y b el mínimo valor de la variable.

Para variables como densidad aparente de suelo, que cuando incrementan el suelo es más compacto, usamos una formula opuesta quedará altos valores a las condiciones consideradas indicando una condición positiva.

$$Y = 1.1 - 0.1 + ((x-b)/(a-b)) \times 0.9$$

Las variables reducidas luego fueron luego multiplicadas por su contribución relativa a las primeras dos componentes del análisis de componentes principales.

El grupo de valores de cada uno de los grupos de los seis subindicadores determinados con la formula inicial fueron luego reducidos para restringir sus variaciones dentro del rango 0.1 y 1.0 facilitando comparaciones entre los valores de los diferentes subindicadores.

Las pasturas mejoradas presentaron los valores más altos para los subindicadores de estabilidad estructural (0.77), biodiversidad (0.69), por consiguiente alto valor de

servicios ecosistémicos (0.87); presentó bajos valores de los subindicadores concentración de gases efecto invernadero (0.23) y alto valor para almacenamiento de carbón (0.35), en consecuencia presenta el valor más alto para regulación de emisiones (0.53); Además presentó un valor del subindicador para tecnología de producción de (0.83), del grupo de variables de caracterización socioeconómica.

Los cultivos permanentes, fueron los sistemas de producción con los siguientes valores más altos para los subindicadores, se destaca caracterización socioeconómica, con tecnología de producción (0.88) y capital humano (0.46), correspondiente al más alto de todos los sistemas de producción; fertilidad química de suelo, presentó un valor alto (0.78), sin embargo éste sistema presentó el valor más bajo entre los sistemas de producción para servicios ecosistémicos (0.60), con los valores más bajos para los subindicadores de estabilidad estructural (0.37), biodiversidad (0.30) y almacenamiento de carbono (0.30). La sabana natural presentó valores similares a éste sistema de producción tanto en servicios ecosistémicos (0.63) en almacenamiento de carbono y regulación de gases efecto invernadero con valores de (0.29 y 0.36) respectivamente.

Paso 4: Construcción del Indicador de Ecoeficiencia

Los valores de los 9 sub-indicadores calculados para de todos los puntos evaluados para cada sistema de producción (cultivos transitorios, sabana nativa, pasturas mejoradas y cultivos permanentes) fueron reunidos dentro de una matrix de datos, realizado un ACP y determinada la inercia total explicada por los factores 1 y 2. El indicador de ecoeficiencia para cada sistema de producción fué obtenido sumando el producto de las respectivas contribuciones de los subindicadores a los factores 1 y 2, multiplicado por la inercia explicada por los factores respectivamente (No se muestran los resultados).

Indicador de Ecoeficiencia: Cultivos transitorios

$$IE_{CT} = SI_{FQ} + SI_{RH} + SI_{BS} + SI_{ES} + SI_{AC} + SI_{GEI} + SI_{TSP} + SI_{DP} + SI_{CH}$$

Indicador de Ecoeficiencia: Sabana nativa

$$IE_{SN} = SI_{FQ} + SI_{RH} + SI_{BS} + SI_{ES} + SI_{AC} + SI_{GEI} + SI_{TSP} + SI_{DP} + SI_{CH}$$

Indicador de Ecoeficiencia: Pasturas mejoradas

$$IE_{PM} = SI_{FQ} + SI_{RH} + SI_{BS} + SI_{ES} + SI_{AC} + SI_{GEI} + SI_{TSP} + SI_{DP} + SI_{CH}$$

Indicador de Ecoeficiencia: Cultivos permanentes

$$IE_{CP} = SI_{FQ} + SI_{RH} + SI_{BS} + SI_{ES} + SI_{AC} + SI_{GEI} + SI_{TSP} + SI_{DP} + SI_{CH}$$

Paso 5: Construcción del Indicador de general de Ecoeficiencia

Los valores de los 9 sub-indicadores calculados para todas las fincas evaluadas (41) fueron reunidos dentro de una matriz de datos, realizado un ACP. La contribución de cada subindicador a la formación de las primeras dos componentes principales y la inercia total fueron determinadas. El indicador general de ecoeficiencia fue obtenido sumando el producto de las respectivas contribuciones de los subindicadores a los factores 1 y 2, multiplicado por la inercia explicada por los factores respectivamente.

La suma de esos productos dio como resultado la fórmula de cálculo para el índice general de ecoeficiencia (IG_E).

$$IG_E = SI_{FQ} + SI_{RH} + SI_{BS} + SI_{ES} + SI_{AC} + SI_{GEI} + SI_{TSP} + SI_{DP} + SI_{CH}$$

Dónde:

IG_E = Indicador general de ecoeficiencia

SI_{FQ} = Subindicador de fertilidad química de suelo

SI_{RH}	=	Subindicador de regulación hídrica
SI_{BS}	=	Subindicador de biodiversidad de suelo
SI_{ES}	=	Subindicador de estabilidad de estructural del suelo
SI_{AC}	=	Subindicador de almacenamiento de carbono
SI_{GEI}	=	Subindicador de gases efecto invernadero
SI_{TSP}	=	Subindicador de tecnología sistemas de producción
SI_{DP}	=	Subindicador de diversidad de paisaje en fincas
SI_{CH}	=	Subindicador de capital humano

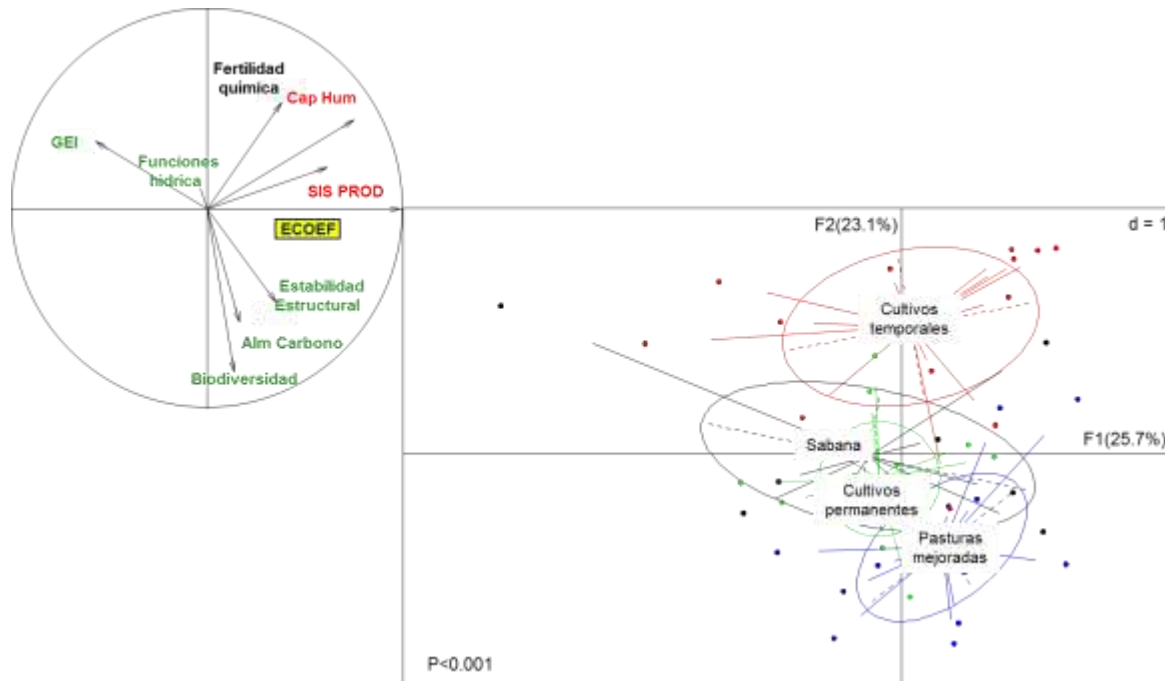
Los valores de cada subindicador y del indicador de Ecoeficiencia se expresan en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de los Indicadores de Ecoeficiencia y Subindicadores en los sistemas productivos: Cultivos transitorios, Sabana nativa, Pasturas mejoradas y Cultivos permanentes

Subindicadores	Cultivos Transitorios	Sabana Nativa	Pasturas Mejoradas	Cultivos Permanentes
Fertilidad química	0,39	0,37	0,48	0,78
Regulación hídrica	0,51	0,32	0,32	0,36
Biodiversidad macroinvertebrados	0,57	0,53	0,69	0,30
Estabilidad estructural	0,41	0,59	0,77	0,37
Almacenamiento de carbón en suelo	0,37	0,29	0,35	0,30
Emisiones de gases efecto invernadero	0,21	0,25	0,23	0,36
Regulación de emisiones de gases	0,39	0,36	0,53	0,37
Tecnología de sistemas de producción	0,91	0,80	0,83	0,88
Diversidad de paisaje en fincas	0,24	0,16	0,16	0,21
Capital humano	0,24	0,39	0,36	0,46
Indicador de Servicios ecosistémicos	0.71	0.63	0.87	0.60
Rango	0.55-0.84	0.10-0.94	0.65-1.00	0.24-0.86
Desviación estándar	0.08	0.24	0.10	0.18
Indicador de Ecoeficiencia	0.66	0.64	0.77	0.71
Rango	0.41-0.81	0.10-0.95	0.49-1.00	0.30-0.96
Desviación estándar	0.10	0.28	0.15	0.21

La figura 27 representa el ACP de todos los subindicadores y el Indicador de Ecoeficiencia.

Figura 27. ACP de todos los subindicadores y el Indicador de Ecoeficiencia.



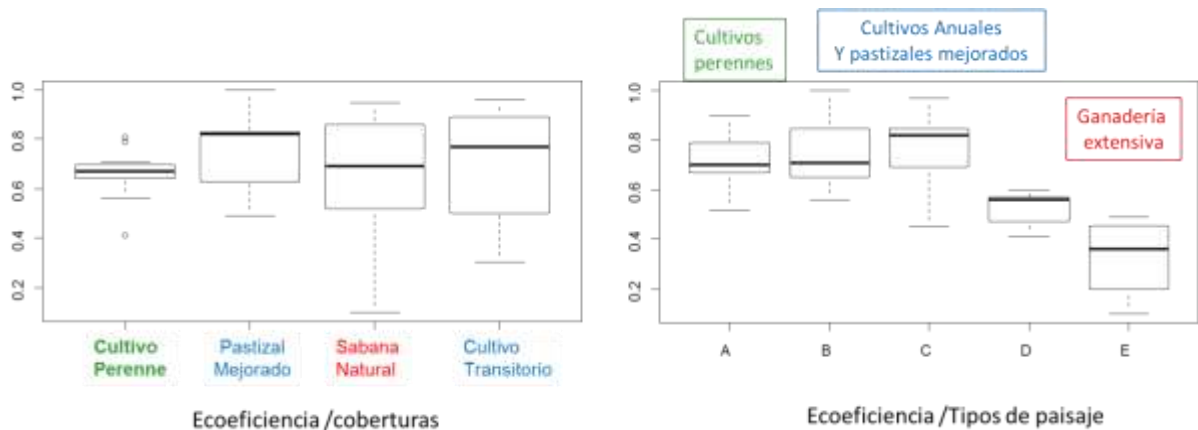
El ACP separa significativamente los sistemas de uso del suelo ($p < 0.001$). El factor 1 (25.7%) separa las fincas que tienen altos valores de los indicadores social (capital humano) y económico (sistema de producción) de las que tienen mínimas emisiones de gases a efecto de invernadero. Aunque los sistemas con cultivos temporales y las pasturas mejoradas tienden a tener valores más positivos en este eje, es el factor 2 (23.1%) que más separa los tipos de cobertura.

Los cultivos transitorios presentan la mayor fertilidad química pero son los que menos contribuyen a la biodiversidad y la estabilidad de los agregados en el suelo. También los que emiten más gases con efecto invernadero. Estos cultivos también son los más determinados por los indicadores socioeconómicos.

Se oponen a estos, las pasturas mejoradas que tienen mayor cobertura vegetal favoreciendo esto la biodiversidad de invertebrados del suelo y su actividad reflejada en mayor estabilidad de agregados y mayor almacenamiento de carbono.

Los siguientes boxplot (Figura 28) reflejan los valores del indicador de ecoeficiencia de los sistemas de producción en función de la cobertura vegetal y los tipos de paisaje.

Figura 28. Valores del indicador de ecoeficiencia de los sistemas de producción en función de la cobertura vegetal y los tipos de paisaje.

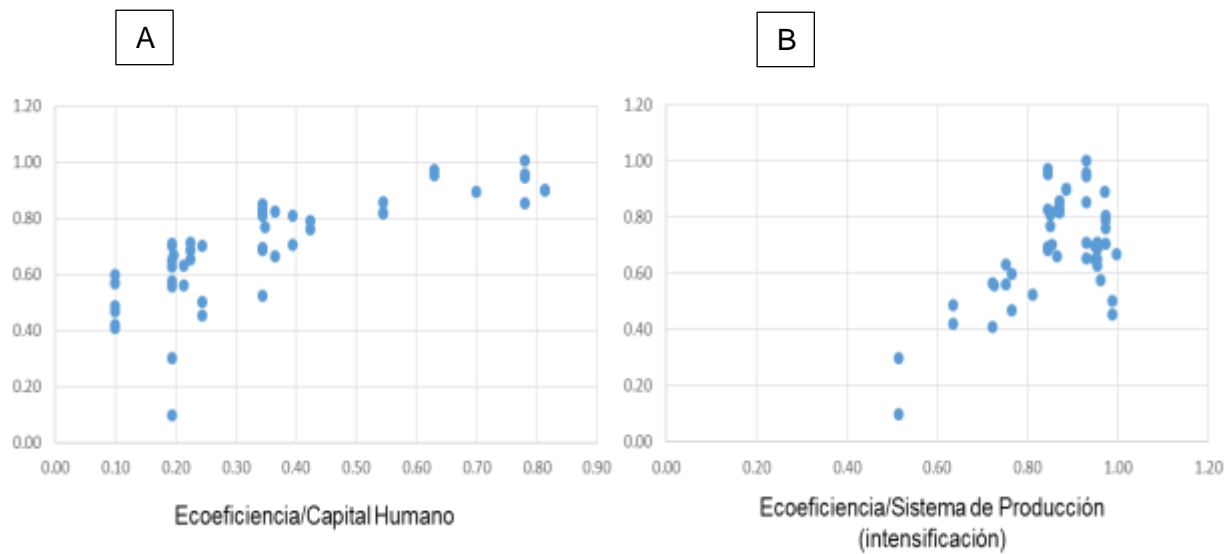


No se notan grandes diferencias de la ecoeficiencia entre los tipos de uso debido a la variabilidad observada a dentro de cada categoría. Los pastizales mejorados y el cultivo transitorio tienden a tener mayores valores promedios por sus respectivas contribuciones a la formación de un capital humano elevado y a condiciones ambientales favorables. La comparación de la ecoeficiencia entre los tipos de paisajes obtenidos del análisis de clusters (no mostrado aquí) muestra un efecto negativo de los paisajes ganaderos sobre la ecoeficiencia, por sus impactos negativos sobre los diferentes componentes del indicador de ecoeficiencia.

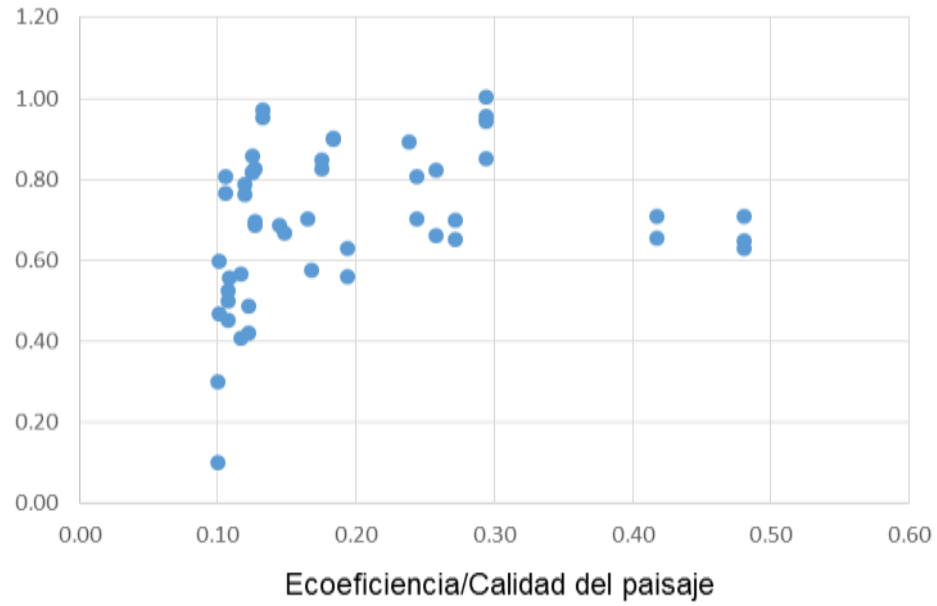
Se observan interesantes relaciones, aparentemente no lineales, entre el indicador de ecoeficiencia y los subindicadores socioeconómicos: Capital humano (Figura 29a); Sistema de producción (Figura 29b) y Paisaje (Figura 30).

La ecoeficiencia aumenta de forma regular con el capital humano y con la intensificación del uso del suelo, hasta un punto de inflexión que corresponde a un valor del indicador de sistemas de producción de 0.9. Después de este valor parece disminuir fuertemente.

Figura 29. Ecoeficiencia reducido en función de Capital Humano (A) y en función del Sistema de producción o intensificación (B).



De forma similar la ecoeficiencia primero aumenta con la intensificación del paisaje, pero disminuye fuertemente en los paisajes más intensificados.

Figura 30. Ecoeficiencia reducido en función de la calidad del paisaje.

8. Discusión.

El extenso trabajo que se llevó a cabo en los años 2011-2012 para evaluar la ecoeficiencia de los sistemas de producción vigentes permitió conocer en detalle los diferentes parámetros sociales, económicos y ambientales que la determinan.

Se establecieron dos bases de datos muy grandes, una socioeconómica con datos socioeconómicos, en 120 fincas, la otra agroecológica en 75 parcelas representativas de los 4 sistemas de producción más usados. Se analizaron las bases independientemente para construir los indicadores social y económico en la primera, ambiental en la segunda. A la hora de construir el indicador de ecoeficiencia, se pudo constituir una tabla con 51 parcelas de la base agroecológica, distribuida en 26 fincas de la base socioeconómica. La relativa falta de coordinación que llevo a esta situación está parcialmente compensada por la aplicación, en la tabla final de 51 parcelas, de los valores de indicadores medidos en la tabla de 120 fincas y la de 75 parcelas respectivamente.

Objetivo 1: Evaluar componentes claves de la productividad, rentabilidad, bienestar social, biodiversidad y servicios ecosistemicos del suelo en cinco sistemas de producción de la altillanura plana.

Se hizo un uso sistemático de métodos multivariados para analizar los datos distribuidos en tablas temáticas como fueron la tabla de datos de química de suelo o de elementos del capital humano, por ejemplo. De esta forma se pudieron identificar las variables que más explican las diferencias observadas entre las fincas.

Tabla 15: Análisis de las variables que más contribuyen a los subindicadores y % de varianza explicada por el tipo de cobertura o de paisaje.

Indicador	Sub indicador	Variables más influyentes en F1	Variables más influyentes en F2	% explicada	variabilidad por coberturas/paisajes
Ambiental (Servicios Ecosistemicos)	Fertilidad química	F1:36.6% Capacidad de intercambio catiónico, Ca, Mg, K, Cu Vs. Saturación de Aluminio del complejo de intercambio	F2: 15,55 % pH vs. Al, saturación de Al y Materia Orgánica	29.3%	p<0.001
	Funciones hídricas	F1: 48.1% textura Meso y macro porosidad , arena vs Retención de agua,	F2 : 21.6% Compactación Densidad aparente vs, porosidad total	10,3%	p<0.03
	Biodiversidad	F1: 43.8%: Abundancia Densidad de todos los grupos	F2: 18,7% Myriapoda Vs. Coleóptera y Insectos sociales	25,7%	p<0.001
	Agregación del suelo	F1: 31.4% Agregados biogénicos vs. Ag. Físicos y suelo sin agregar (32.4% varianza explicada; p<0.01)	F2 : 23.2% Stones, suelo sin agregar	32,4%	p<0,01
	Regulación climática	Almacenamiento de Carbono en biomasa y suelo ANOVA p<0.01	Emisiones de gases efecto de invernadero ANOVA p>0.05	N.A.	
Social	Capital Humano	F1: 22,1% Productor joven y capacitado con abundante mano de obra Vs. Viejo con poca mano de obra permanente	F2: 14,9% Mano de obra femenina		En función de tipos de paisaje: 10% p<0.001
Económico	Sistema de Producción	F1: 21,9% Cultivos transitorios, hacen análisis, corrección, preparación y labranza de suelo, control de maleza y de plagas y buscan rentabilidad vs. Ganadería y pastoreo continuo	F2: 11,6% cultivos de fácil comercio y bajo riesgo, asociado a ganadería vs otros sistemas		En función de tipo de paisaje 7% p<0.01

Se confirmó así que el principal obstáculo a la agricultura es la baja fertilidad química y física de los suelos. Son ácidos, con altos niveles de saturación de aluminio, del complejo de intercambio que los vuelven tóxicos para las plantas. Además de esto, por su textura relativamente fina y la falta de micro agregación, estos suelos están sumamente compactos, lo que resulta en una capacidad muy baja a infiltrar y retener el agua: en promedio, la proporción volumétrica de agua útil en el suelo varía de 5 a 7%, valores bajísimos en comparación con cualquier otro tipo de suelos. La fauna del suelo puede ser relativamente abundante, pero está muy sensible al efecto de las prácticas que se adoptan para mejorar la calidad del suelo y defender los cultivos: labranza profunda, aportes de cal, uso de pesticidas y abonos químicos en lugar de orgánicos.

Una consecuencia de esto es que los suelos de cultivos transitorios que han recibido la mayor inversión para mejorar su calidad tienen una macrofauna muy reducida lo que va a acelerar la compactación después de las intervenciones mientras se pierde mucho nitrógeno en forma de gases a efecto de invernadero (NOx). Los cultivos perenes mantienen una mejor calidad física mientras que los pastizales mejorados que han aprovechado del proceso de mejoramiento del suelo ofrecen condiciones mejoradas a la macrofauna, especialmente las lombrices de tierra que más que duplicar sus poblaciones en relación con la sabana natural.

La sabana natural de hecho, tiene suelos tan pobres en los puntos de vista químico, físico y hasta biológico, que cualquier intervención que se haga tiende a mejorar por lo menos uno de los servicios ecosistémicos, Situación que es corroborada por Amezcuita.

El entorno social se caracteriza por el tipo de gente que vive en estos espacios poco poblados. La política de desarrollo impulsada por el gobierno ha llevado a inversionistas a comprar tierras y desarrollar cultivos de renta, transitorios y/o perenes. Se oponen dos poblaciones, jóvenes capacitados que montan fincas empresariales con mano de obra abundante incluyendo mujeres, y

pobladores tradicionales con más edad en promedio que empelan poca mano de obra y se dedican más que todo a la ganadería extensiva y cultivos mixtos.

El entorno económico está muy relacionado con la intensificación del uso de la tierra, oponiendo sistemas de cultivo intensificados que usan todos los elementos de la agricultura convencional desarrollada durante la revolución verde en busca de rentabilidad a sistemas más tradicionales de policultivos y ganadería extensiva donde se busca seguridad en la producción.

Objetivo 2. Determinar subindicadores sintéticos relacionados con la oferta ambiental y la oferta socioeconómica en la altillanura plana Orinocense para luego construir un indicador general de ecoeficiencia.

El uso general del método propuesto por Velásquez *et al* (2007) ha permitido elaborar indicadores de naturaleza muy variadas que han conseguido sintetizar las enormes bases de datos iniciales en indicadores sencillos y fáciles de entender. Esta generalización de la metodología resulta ser una herramienta poderosa a la hora de medir y analizar las relaciones entre entornos sociales, económicos y ambientales de naturaleza distinta. Ya validada en trabajos anteriores (Lavelle *et al.*, 2016; Londoño, 2016) esta metodología se puede recomendar para cualquier estudio futuro con similares metas. Las variaciones observadas entre sistemas de producción, tipos sociales o paisaje y las coinercia analizada entre ellos fueron lógicos, permitiendo identificar los elementos claves de la dinámica global que experimenta esta región.

Los indicadores elaborados a partir de una selección de variables significativas se podrán usar en el futuro para seguir monitoreando los sistemas de producción. Al limitar el trabajo de monitoreo a la medición de las pocas variables aparecidas como muy significativas, se reducirá considerablemente el costo del monitoreo. Es interesante notar aquí que en otro estudio hecho para el mismo proyecto se pudo confirmar que la fórmula

de los indicadores de suelo diseñada en el año 2011 se aplicaba perfectamente a los datos tomados en el año siguiente (Lavelle et al, 2012).

Objetivo 3. Evaluar las condiciones que favorecen la ecoeficiencia de los sistemas presentes en la altillanura plana (parcelas, fincas y paisaje).

Se pudo comprobar que hay múltiples formas de conseguir una ecoeficiencia elevada. En cada tipo de sistemas productivo experimentado, de los cultivos transitorios a perenes y ganadería en pastizales mejorados o en la sabana natural, se presentaron situaciones no tan buenas (con valores del indicador iguales al mínimo de 0,10) y también buenas. El compromiso entre tres elementos bien distintos, social, económico y ambiental puede hacerse de muy diferentes maneras. Sin embargo, pudimos detectar tendencias muy interesantes en la relación de los diferentes elementos con el indicador (figura 29 y 30). La relación entre los diferentes componentes sociales, económicos y paisajísticos y la ecoeficiencia parece ser no lineal. Mientras que la ecoeficiencia aumenta rápidamente con el capital humano hasta un valor de 0,40 aproximadamente de este, pasado este valor ya no aumenta. Este significa que es importante entender a qué condiciones precisas corresponde este valor de 0,40 para integrarlo en políticas públicas.

La relación con el indicador económico que es, *en fin*, un indicador de intensificación del uso de la tierra sube de forma muy abrupta hasta un punto de umbral sorprendente para los niveles máximos de intensificación. En este caso, una vez verificado y validado la existencia de este punto de umbral, estará muy importante entender lo que pasa en este punto y tomarlo en cuenta para las operaciones anteriores de desarrollo.

Finalmente, la relación del indicador de ecoeficiencia con el indicador de calidad del paisaje muestra una tendencia muy interesante. Si bien la ecoeficiencia no es elevada en los sitios mejor preservados, se nota una tendencia al deterioro de la ecoeficiencia en paisajes de mala calidad, donde se han eliminado los espacios naturales y los elementos

arbóreos. Es muy importante tomar en cuenta esta tendencia ya que es el resultado de procesos que se han desarrollado en un tiempo muy corto.

Los análisis muestran que si bien se puede hablar de una sinergia entre Capital Humano y Sistema de producción, la mayoría de los servicios ambientales siguen dinámicas opuestas a estos dos indicadores. La construcción de paisajes ecoeficientes puede ser la forma de crear sinergias entre los entornos ambiental, social y económico en esta región.

Para la construcción de un Indicador de ecoeficiencia (IE) inicialmente se crearon los sub indicadores Socioeconómico y Ambiental, con el objetivo de determinar indicadores de ecoeficiencia de cinco sistemas productivos de la Altillanura plana (Sabana Nativa, Pasturas Mejoradas, cultivos transitorios (Arroz, Maíz y Soya) y cultivos permanentes (Caucho y Palma de Aceite)). El Indicador debe permitir: identificar, interpretar y evaluar variables como número de trabajadores, capacitación, creación y cualificación de empleo, calidad del empleo, generación de ingresos, diversificación de fuentes de ingresos, tenencia de la tierra, valor de la propiedad, salud ambiental y personal, seguridad alimentaria, además de seguridad ocupacional a nivel socioeconómico y a nivel ambiental las variables asociadas a la fertilidad de suelos, a las funciones hídricas, a la estabilidad de los suelos, biodiversidad (macro-fauna), control climático (regulación de emisiones, carbono en biomasa aérea de los cultivos y almacenamiento de carbono), servicios ecosistémicos en los diferentes sistemas de uso. Con el fin último de proponer alternativas de manejo y uso sostenible de producciones agrícolas frágiles y altamente intervenidas como los de la altillanura Orinoquia Colombiana (Rincón, E & Wellens, A. 2011).

La metodología del indicador de ecoeficiencia es aplicable a cualquier grupo de sitios que necesitan una evaluación metodológica comparativa. Sin embargo, pueden existir problemas en la selección de las variables cuando el indicador tiene que responder a una gran diversidad de objetivos. Por ejemplo, la comparación de la eficiencia de diferentes técnicas en un intento de rehabilitar los suelos degradados, evaluar los efectos de los

diferentes sistemas de uso del suelo, las funciones ecológicas o la evaluación de una política general de recursos naturales y la protección de la biodiversidad (Velásquez et al., 2007).

La calidad de un indicador depende en gran medida de la calidad de las materias primas y datos utilizados para su construcción y su medida. La mayoría de los indicadores disponibles en la literatura no se han validado, ni su sensibilidad ha sido probada en una amplia gama de situaciones (Velásquez, 2007).

En el aspecto socioeconómico se observa una separación significativa entre los tipos de paisaje, de sistemas de producción y de capital humano, con un efecto más fuerte del paisaje. Las plantaciones perennes y bosques se asocian a mayores valores de capital humano (hay mucha mano de obra y productores formados); La intensificación de los sistemas de producción es mayor en plantaciones perennes, cultivos transitorios y pasturas mejoradas, la conservación del paisaje es mejor en donde hay mucha savana y un poco donde hay bosques o savanas nativas.

Los indicadores de fertilidad química de suelos propuestos se refieren a condiciones que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos (Orozco, et al 2015; Larson and Pierce, 1991). 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, las demás variables se agrupan en un área del círculo, separándose levemente por profundidad. Esta separación nos 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 similar a lo planteado por Gómez, 2010; Friesen et al, 1997; Friesen et al, 1998. 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 que coincide con lo expresado por Doran y Parkin, 1994 y Gregorich *et al*, 1994.

Se observaron algunas fincas que se separaron del conglomerado de las fincas, estas fincas probablemente contienen suelos recientemente ingresados a la producción agropecuaria como se puede ver también en López-Hernández 2005; Oberson *et al* (2001). El mejoramiento químico debe incluir el uso de enmiendas hasta la profundidad a la cual se laboree el suelo y no sólo hasta 10 cm como actualmente se hace, en la cantidad que lo determine el análisis del suelo y con los correctivos que sean necesarios (Amézquita, 1999 y Phiri *et al*, 2001a).

Se debe también adicionar al suelo los nutrientes necesarios para obtener buenos rendimientos, ya que esto garantiza la formación de una buena cantidad de biomasa externa e interna (raíces) que a la vez actuará como correctivo del suelo (Phiri *et al*, 2003b; Picone *et al*, 2003).

Las características físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de las funciones hídricas del recurso suelo (Singer y Ewing, 2000). Las propiedades físicas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las relacionadas con el movimiento del agua dentro del perfil son la estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada.

De estas variables evaluadas las que revisten mayor importancia por lo presentado en estos suelos es la alta densidad aparente y la alta resistencia a la penetración lo cual hace que estos suelos sean muy adensados y compactados, que impiden su laboreo con fines agrícolas (Amézquita, 1999; Lal, 1994; Amézquita, E. 1994)

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 (Ordúz *et al* 2010; Amézquita, E.; Londoño. H. 1997).

Los cultivos transitorios debido a las condiciones de laboreo 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, opinión que coincide con Camacho-Tamayo, *et al* 2010 y Bravo & Florentino. (1997).

La macrofauna del suelo es un indicador muy usado (Velásquez *et al.*, 2007; Ruiz-Camacho, 2011) que refleja por una parte la inmensa biodiversidad endógena (microflora, micro y meso fauna) y por otra parte indica el posible impacto de estos transformadores de material vegetal muerto e ingenieros del ecosistema sobre las diferentes funciones del suelo (Lavelle y Spain, 2001 Topoliantz *et al* 2000). Además, para el mejoramiento biológico del suelo se sugiere: (a) elevar el contenido de materia orgánica mediante la promoción de raíces y la incorporación de residuos; (b) incrementar la estabilidad de los agregados mediante la incorporación de materiales orgánicos lignificados y fragmentados (2-3 cm); (c) propiciar el incremento del reciclaje superficial de nutrientes a través del uso del "mulch"; y (d) propiciar el uso de plantas de raíces profundas para mejorar la condición estructural del suelo en profundidad (Rao *et al*, 1996. Campanhola *et al*, 2004).

El indicador mostró una variación altamente significativa entre los sistemas de uso, con valores máximos en las pasturas mejoradas, seguido por la sabana natural. Los cultivos perennes mantienen valores cercanos a la sabana natural mientras los cultivos anuales tienen los valores más bajos (Domínguez, 2017 y Decaëns, *et al.*, (2001).

El análisis morfológico del suelo de Velásquez *et al* 2007 modificada de Ponge (1999), con algunas modificaciones, es una técnica descriptiva que permite diferenciar y

cuantificar, constituyentes orgánicos y minerales del suelo organizados en agregados, estructuras biogénicas particulares, componentes vegetales y, piedras. Se definen los constituyentes del suelo de acuerdo a su forma (esférica, redonda o alargada), tamaño, origen (mineral, orgánico). La actividad de la macro-fauna y las diferentes bioestructuras que estos producen pueden ser cuantificadas y relacionadas por medio de esta característica (Velásquez, 2004; Quintero *et al*, 2016 y Torres, J. 2016).

Se puede decir que cada sistema tiene la capacidad de mejorar por lo menos uno de los servicios ecosistémicos medido, mientras que otros servicios se quedan con valores muy bajos mostrando una degradación muy rápida de las funciones asociadas (Rincón, E & Wellens, A. 2011 y Goedkoop, et al, 2000). Esta observación sugiere 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 mantener la producción de servicios ambientales a niveles buenos, evitando así la degradación del capital natural representado por estos suelos (Lehni, 2000; López y Torres, 2001).

La incorporación de los suelos “naturales” o en 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 costos de producción.

9. Conclusiones y Recomendaciones

9.1 Conclusiones

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 C y los cultivos anuales mejoran la calidad química del suelo, pero impactan de forma distinta las otras funciones en comparación con la sabana natural.

Se comprobó que el indicador socioeconómico califica de muy buena forma el aporte económico de las fincas al indicador de ecoeficiencia lo cual implica buenas producciones a una rentabilidad razonable y estable a través del tiempo, lo cual haga atractivo continuar con dicho manejo mientras que el aporte social es bajo con respecto al indicador de ecoeficiencia debido a que se requiere un manejo que permita a la organización social (finca) un grado aceptable de satisfacción de sus necesidades en cuanto a la caracterización de los sistemas de producción en uso, los datos sobre tasas de adopción, costos de producción y niveles de impacto en términos sociales.

Se observó la relación entre el indicador de ecoeficiencia y los tres componentes socioeconómicos, se observan patrones muy interesantes así (1) La ecoeficiencia aumenta de forma regular con el capital humano, (2) La ecoeficiencia aumenta con la intensificación del uso, hasta un punto de inflexión que corresponde a un valor del

indicador de sistemas de producción de 0.9 y parece disminuir de forma abrupta justo después; (3) La ecoeficiencia aumenta con la intensificación del paisaje, pero disminuye fuertemente en los paisajes más intensificados

9.2 . Recomendaciones

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 el ajuste a condiciones locales de algunos detalles metodológicos, como por ejemplo el cálculo de acumulación de biomasa para calcular acumulación de carbono vía medidas alométricas utilizando modelos desarrollados específicamente para las especies en Colombia.

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.

Es necesario realizar estudios a mayor escala y detalle de suelos y cobertura no solo en territorios como la Altillanura, sino también en aquellas áreas ya intervenidas para corregir o balancear la finalidad comercial y el mantenimiento armónico con el ecosistema. Las coberturas y/o usos de la tierra, son información dinámica que requiere ser actualizada con el fin de alertar sobre posibles intervenciones en áreas que no garantizan ni la sostenibilidad del ecosistema ni la rentabilidad del sistema de producción.

Se separaron 6 indicadores que muestran variaciones lógicas entre las parcelas y los sistemas de uso, constituyendo una herramienta de valor para diagnósticos futuros. El

modo de cálculo de la fórmula basada en las variables más influyentes y/o 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.

Es necesario reforzar la base de datos en ciertos tipos de uso e incluir otros tipos que no fueron evaluados en el primer año (caña de azúcar), y considerar los sistemas naturales (bosque y morichales).

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 a los resultados del indicador sintético global de ecoeficiencia, por tal razón, este debe fundamentarse en una serie de criterios concretos condicionados por la disponibilidad estadística de cada sitio o parcela analizada.

A. Anexo: Tabla de datos de variables con información básica sobre las 41 fincas donde se realizó el muestreo

Zona	Coordenadas Geográficas	Finca	Finca	Sistema de Producción	Orden de Suelos	Suborden de Suelos	Edad del Cultivo	Manejo	Observaciones
PL	4.153485 - 72.463639	Andremoni	AND	Transitorio Maíz	Inceptisoles	Andaquepts	4 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.153632 - 72.463234	Andremoni	AND	Pastura Mejorada	Inceptisoles	Plinthaquepts	8 meses	Convencional - Orgánico	Ninguna
PL	4.102794 - 72.432391	Clarijones	CLA	Caucho	Inceptisoles	Quartzipsamments	24 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.116583 - 72.412329	La Ponderosa	LAP	Pastura Mejorada	Inceptisoles	Tropaquepts	10 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.155678 - 72.475454	Las Brisas	BRI	Pastura Mejorada	Inceptisoles	Quartzipsamments	10 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.125711 - 72.452334	Los Cocos	COC	Pastura Mejorada	Inceptisoles	Dystropepts,	10 meses	Convencional - Orgánico	Ninguna
PL	4.136313 - 72.458932	Los Cocos	COC	Sabana Nativa	Inceptisoles	Plinthaquepts		No se realiza manejo	Ninguna
PL	4.127689 - 72.437496	Matazul	MAT	Caucho	Inceptisoles	Quartzipsamments	15 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.157689 - 72.467397	Matazul	MAT	Caucho	Inceptisoles	Andaquepts	20 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.114648 - 72.423781	San Carlos	SCA	Caucho	Inceptisoles	Aquepts	18 meses	Convencional - Orgánico	Ninguna
PL	4.107632 - 72.429321	Santa Cruz	SCR	Transitorio Arroz	Inceptisoles	Tropaquepts	4 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.107615 - 72.424001	Santa Cruz	SCR	Pastura Mejorada	Inceptisoles	Plinthaquepts	18 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.106762 - 72.426753	Santa Cruz	SCR	Sabana Nativa	Inceptisoles	Quartzipsamments		No se realiza	Ninguna

								manejo	
PL	4.143249 - 72.454021	Tierra Grata	TGR	Caucho	Inceptisoles	Tropaquepts	28 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.143453 - 72.457403	Tierra Grata	TGR	Sabana Nativa	Inceptisoles	Quartzipsamments		No se realiza manejo	Ninguna
PL	4.134532 - 72.430421	Tierra Prometida	TPR	Transitorio Arroz	Inceptisoles	Andaquepts	4 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.137632 - 72.431405	Tierra Prometida	TPR	Transitorio Soya	Inceptisoles	Aquepts	4 meses	Convencional	Ninguna
PL	4.128219 - 72.474016	Versalles	VER	Sabana Nativa	Inceptisoles	Tropaquepts		No se realiza manejo	Ninguna
PL	4.117632 - 72.446741	Versalles	VER	Transitorio Soya	Inceptisoles	Tropaquepts	5 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.345456 - 72.242449	Albaté	ALB	Transitorio Maíz	Oxisoles	Typic Haplustox	6 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.348543 - 72.241990	Albaté	ALB	Transitorio Soya	Oxisoles	Typic Acrorthox	6 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.352314 - 72.251111	Alto de Neblinas	ANB	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Hapludox	35 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.355676 - 72.251004	Alto de Neblinas	ANB	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Acrorthox	45 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.368652 - 72.281923	Cassandra	CAS	Caucho	Oxisoles	Typic Haplorthox	30 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.373498 - 72.291421	Cimarrones	CIM	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Haplustox	18 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.373128 - 72.201995	Cimarrones	CIM	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Haplustox		No se realiza manejo	Ninguna
PG	4.338534 - 72.231436	Corocora	COR	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Hapludox	40 meses	Convencional – Orgánico	Ninguna
PG	4.338661 - 72.231929	Corocora	COR	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Hapludox	24 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.325636 - 72.271922	El Espejo	SPJ	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Haplustox	35 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.328511 - 72.271232	El Espejo	SPJ	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Acrorthox	18 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.358566 - 72.252000	El Porvenir	POR	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Acrorthox	40 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.333852 - 72.235200	La Camila	LAC	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Haplustox	40 meses	Convencional – Orgánico	Ninguna
PG	4.333125 - 72.237652	La Camila	LAC	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Haplorthox	19 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.333289 - 72.232003	La Camila	LAC	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Haplustox		No se realiza manejo	Ninguna

PG	4.358566 - 72.252004	La Vencedora	VEN	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Acrorthox		No se realiza manejo	Ninguna
PG	4.346116 - 72.248920	Las Nubes	NUB	Transitorio Soya	Oxisoles	Typic Hapludox	5 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.458534 - 72.324200	Los Venados	LSV	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Acrorthox	40 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.469856 - 72.320071	Los Venados	LSV	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Haplorthox	40 meses	Convencional – Orgánico	Ninguna
PG	4.400585 - 72.325200	Manuelita	MAN	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Haplustox	40 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.453851 - 72.326520	Manuelita	MAN	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Haplustox	50 meses	Convencional – Orgánico	Ninguna
PG	4.358529 - 72.252341	Margaritas	MAG	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Hapludox		No se realiza manejo	Ninguna
PG	4.378545 - 72.242352	Mavalle	MAV	Caucho	Oxisoles	Typic Hapludox	28 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.373485 - 72.255201	Miravalle	MIR	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Haplustox	40 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.368356 - 72.262013	Mundo Nuevo	MNU	Caucho	Oxisoles	Typic Acrorthox	30 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.365562 - 72.252021	Pavillai	PAV	Transitorio Arroz	Oxisoles	Typic Acrorthox	5 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.364242 - 72.252324	Pavillai	PAV	Transitorio Soya	Oxisoles	Typic Haplustox	5 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.341132 - 72.242456	Penjamo	PEN	Caucho	Oxisoles	Typic Haplorthox	23 meses	Convencional – Orgánico	Ninguna
PG	4.348975 - 72.242023	Penjamo	PEN	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Acrorthox		No se realiza manejo	Ninguna
PG	4.318252 - 72.302340	Santa Rita	SRI	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Hapludox	24 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.318456 - 72.305201	Santa Rita	SRI	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Haplorthox	12 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.325652 - 72.352022	Sapuga	SAP	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Acrorthox	45 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.328235 - 72.352312	Sapuga	SAP	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Haplustox	28 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.328566 - 72.352089	Sapuga	SAP	Palma de Aceite	Oxisoles	Typic Acrorthox	12 meses	Convencional	Ninguna
PG	4.358566 - 72.251989	Taluma	TAL	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Hapludox		No se realiza manejo	Ninguna
PG	4.352245 - 72.242325	Varsovia	VAR	Caucho	Oxisoles	Typic Acrorthox	28 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.813585 - 72.102520	Carimagua	CAR	Transitorio Arroz	Oxisoles	Typic Haplorthox	6 meses	Convencional	Ninguna

CAR	4.815925 - 71.107742	Carimagua	CAR	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Haplustox	23 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.815683 - 71.102747	Carimagua	CAR	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Haplustox	24 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.815751 - 71.115734	Carimagua	CAR	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Hapludox		No se realiza manejo	Ninguna
CAR	4.821589 - 71.110325	Cosargo	COS	Transitorio Arroz	Oxisoles	Typic Hapludox	6 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.822592 - 71.110752	Cosargo	COS	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Haplustox	27 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.825925 - 71.110277	Cosargo	COS	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Acrorthox		No se realiza manejo	Ninguna
CAR	4.822585 - 71.113073	Cosargo	COS	Transitorio Soya	Oxisoles	Typic Acrorthox	6 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.814559 - 71.103829	El Encanto	ENC	Caucho	Oxisoles	Typic Haplustox	26 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.814761 - 71.107347	El Encanto	ENC	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Haplorthox	19 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.833595 - 71.110861	Gran Chaparral (Mónica)	GCH	Transitorio Arroz	Oxisoles	Typic Acrorthox	5 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.833942 - 71.110733	Gran Chaparral (Mónica)	GCH	Transitorio Soya	Oxisoles	Typic Haplustox	5 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.801142 - 71.105366	La Esperanza	LSP	Caucho	Oxisoles	Typic Haplustox	30 meses	Convencional - Orgánico	Ninguna
CAR	4.803425 - 71.109867	La Esperanza	LSP	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Haplorthox	25 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.851925 - 71.120365	Maracas	MAR	Caucho	Oxisoles	Typic Haplustox	30 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.853527 - 71.123450	Maracas	MAR	Pastura Mejorada	Oxisoles	Typic Acrorthox	22 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.847865 - 71.123507	Merecure	MER	Caucho	Oxisoles	Typic Haplustox	25 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.849250 - 71.126340	Merecure	MER	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Hapludox		No se realiza manejo	Ninguna
CAR	4.861159 - 71.130344	Pajuil (pajonales)	PAJ	Caucho	Oxisoles	Typic Haplorthox	30 meses	Convencional	Ninguna
CAR	4.861234 - 71.130792	Pajuil (pajonales)	PAJ	Sabana Nativa	Oxisoles	Typic Haplustox		No se realiza manejo	Ninguna

B. Anexo: Tabla de datos de variables de regulación climática (gases efecto invernadero)

Zona	Finca	Finca	Sistema	BIO (Ton C/ha)	AC (Ton C/ha)	CO2 (kg/m ² .año)	CH4 (mg/m ² .año)	Equivalente CH4		Equivalente N2O
								CO ₂ (kg/m ² .año)	N2O (mg/m ² .año)	CO ₂ (kg/m ² .año)
PL	Andremoni	AND	TM	1,2	71,92	0,357	384,12	0,0277	1824,37	0,5272
PL	Andremoni	AND	PM	2,79	81,7	0,384	297,07	0,0214	3035,31	0,8772
PL	Clarijones	CLA	C	27,74	49	0,351	903,69	0,0651	570,87	0,165
PL	La Ponderosa	LAP	PM	2	80,71	0,204	746,5	0,0537	1371,77	0,3964
PL	Las Brisas	BRI	PM	2,77	92,69	0,146	889,02	0,064	5232,1	1,5121
PL	Los Cocos	COC	PM	2,95	84,5	0,219	235,9	0,017	65,14	0,0188
PL	Los Cocos	COC	SN	1,72	66,81	0,207	285,2	0,0205	543,92	0,1572
PL	Matazul	MAT	C	6,95	59,03	0,209	21,57	0,0016	2348,02	0,6786
PL	Matazul	MAT	C	1,2	40,14	0,254	-224,06	-0,0161	3231	0,9338
PL	San Carlos	SCA	C	101,3	56,74	0,52	-38,01	-0,0027	2464,65	0,7123
PL	Santa Cruz	SCR	TA	1,23	74,46	0,179	263,62	0,019	1903,56	0,5501
PL	Santa Cruz	SCR	PM	3,06	70,12	0,184	152,96	0,011	1659,88	0,4797
PL	Santa Cruz	SCR	SN	1,07	63,68	0,254	-102,83	-0,0074	1164,55	0,3366

PL	Tierra Grata	TGR	C	61,91	31,9	0,427	509,91	0,0367	5200,86	1,503
PL	Tierra Grata	TGR	SN	1,86	29,25	0,221	82,2	0,0059	4265,97	1,2329
PL	Tierra Prometida	TPR	TA	0,47	64,52	0,222	-464,8	-0,0335	11768,55	3,4011
PL	Tierra Prometida	TPR	TS	2,33	63,13	0,173	205,68	0,0148	7058,22	2,0398
PL	Versalles	VER	SN	2,39	40,77	0,09	-157	-0,0113	8414,08	2,4317
PL	Versalles	VER	TS	1,49	59,98	0,224	428,41	0,0308	5593,96	1,6167
PG	Albaté	ALB	TM	1,65	68,58	0,15	-177,78	-0,0128	204,05	0,059
PG	Albaté	ALB	TS	0,86	58,64	0,211	79,91	0,0058	3770,04	1,0895
PG	Alto de Neblinas	ANB	PA	18,16	55,32	0,215	461,64	0,0332	2677,78	0,7739
PG	Alto de Neblinas	ANB	PA	43,2	60,04	0,23	292,39	0,0211	13,68	0,004
PG	Casandra	CAS	C	18,16	51,03	0,211	-188	-0,0135	1620,09	0,4682
PG	Cimarrones	CIM	PM	1,53	44,3	0,374	92,5	0,0067	767,33	0,2218
PG	Cimarrones	CIM	SN	3,02	57,34	0,141	488,37	0,0352	1209,66	0,3496
PG	Corocora	COR	PA	45,56	52,77	0,186	158,35	0,0114	170,41	0,0492
PG	Corocora	COR	PA	1,53	62,26	0,276	247,05	0,0178	956,21	0,2763
PG	El Espejo	SPJ	PA	29,49	29,83	0,167	163,71	0,0118	2368,73	0,6846
PG	El Espejo	SPJ	PM	2,74	73,15	0,311	-5,96	-0,0004	208,23	0,0602
PG	El Porvenir	POR	PA	42,42	39,87	0,187	55,55	0,004	1173,34	0,3391
PG	La Camila	LAC	PA	26,55	62	0,154	-85,34	-0,0061	452,54	0,1308
PG	La Camila	LAC	PM	3,6	69,42	0,436	1564,74	0,1127	1405,6	0,4062
PG	La Camila	LAC	SN	3,39	68,5	0,089	145,05	0,0104	119,91	0,0347
PG	La Vencedora	VEN	SN	3,25	54,58	0,161	-220,23	-0,0159	4255,58	1,2299
PG	Las Nubes	NUB	TS	1,65	53	0,152	-528,76	-0,0381	52,48	0,0152
PG	Los Venados	LSV	PA	2,74	53,91	0,192	27,1	0,002	2240,09	0,6474
PG	Los Venados	LSV	PA	113,26	57,17	0,256	-378,61	-0,0273	305,97	0,0884
PG	Manuelita	MAN	PA	42,53	61,24	0,159	-1,35	-0,0001	681,63	0,197

PG	Manuelita	MAN	PA	3,6	44,08	0,373	258,78	0,0186	585,39	0,1692
PG	Margaritas	MAG	SN	4,13	56,38	0,115	-206,09	-0,0148	112,72	0,0326
PG	Mavalle	MAV	C	54,45	63,15	0,404	339,7	0,0245	6579,84	1,9016
PG	Miravalle	MIR	PA	47,71	64,82	0,136	1120,45	0,0807	1914,17	0,5532
PG	Mundo Nuevo	MNU	C	8,28	62,96	0,25	-49,09	-0,0035	692,26	0,2001
PG	Pavillai	PAV	TA	2,38	64,31	0,205	-144,18	-0,0104	2865,76	0,8282
PG	Pavillai	PAV	TS	0,94	55,41	0,141	-164,45	-0,0118	803,71	0,2323
PG	Pénjamo	PEN	C	1,52	52,85	0,129	242,1	0,0174	658,59	0,1903
PG	Pénjamo	PEN	SN	3,79	58,23	0,14	1546,59	0,1114	703,63	0,2033
PG	Santa Rita	SRI	PM	3,37	58,42	0,283	-107,71	-0,0078	509,62	0,1473
PG	Santa Rita	SRI	PM	1,2	63,71	0,221	14,59	0,0011	678,07	0,196
PG	Sapuga	SAP	PA	44,82	62,58	0,105	198,41	0,0143	1475,42	0,4264
PG	Sapuga	SAP	PA	28,22	45,49	0,205	-62,05	-0,0045	932,01	0,2694
PG	Sapuga	SAP	PA	39,7	51,99	0,196	70,48	0,0051	1190,46	0,344
PG	Taluma	TAL	SN	2,99	57,82	0,258	543,27	0,0391	3023,22	0,8737
PG	Varsovia	VAR	C	0,21	60,44	0,134	-47,19	-0,0034	707,12	0,2044
PG	Carimagua	CAR	TA	1,1	63,81	0,247	-139,19	-0,01	1247,23	0,3604
CAR	Carimagua	CAR	PM	3,95	63,41	0,298	-50,63	-0,0036	54,5	0,0158
CAR	Carimagua	CAR	PM	1,23	79,85	0,349	19,16	0,0014	2406,03	0,6953
CAR	Carimagua	CAR	SN	2,18	58,33	0,146	-7,18	-0,0005	641,24	0,1853
CAR	Cosargo	COS	TA	0,64	58,89	0,167	-165,43	-0,0119	1211,77	0,3502
CAR	Cosargo	COS	PM	3,59	61,36	0,187	-377,29	-0,0272	612,6	0,177
CAR	Cosargo	COS	SN	2,39	49,5	0,136	-303,13	-0,0218	138,58	0,04
CAR	Cosargo	COS	TS	1,56	62,49	0,184	66,78	0,0048	4029,42	1,1645
CAR	El Encanto	ENC	C	2,01	65,74	0,223	265,46	0,0191	577,97	0,167
CAR	El Encanto	ENC	PM	3,76	63,31	0,294	105,23	0,0076	765,74	0,2213

CAR	Gran Chaparral (Mónica)	GCH	TA	4,49	30,66	0,266	-66,03	-0,0048	1575,43	0,4553
CAR	Gran Chaparral (Mónica)	GCH	TS	4,09	54,57	0,144	78,27	0,0056	1321,88	0,382
CAR	La Esperanza	LSP	C	3,38	55,32	0,136	305,7	0,022	876,93	0,2534
CAR	La Esperanza	LSP	PM	1,15	59,92	0,187	300,83	0,0217	1921,04	0,5552
CAR	Maracas	MAR	C	0,42	48,94	0,189	370,7	0,0267	827,65	0,2392
CAR	Maracas	MAR	PM	2,52	61,72	0,168	621,2	0,0447	1535,97	0,4439
CAR	Merecure	MER	C	1,09	36,65	0,196	-274,39	-0,0198	475,66	0,1375
CAR	Merecure	MER	SN	2,19	54,75	0,193	-100,95	-0,0073	3737,47	1,0801
CAR	Pajuil (pajonales)	PAJ	C	0,57	47,78	0,111	280,66	0,0202	3151,21	0,9107
CAR	Pajuil (pajonales)	PAJ	SN	2,47	58,96	0,092	122,57	0,0088	1452,7	0,4198

Zona: PL: Puerto López; PG: Puerto Gaitán; CAR: Carimagua; **Sistemas de producción:** SN: Sabana Nativa
 PM: Pastura Mejorada; TS: Transitorio Soya; TA: Transitorio Arroz; TM: transitorio Maíz; PA: Palma de Aceite; C: Caucho;

C. Anexo : Encuesta Realizada para Caracterización Socioeconómica en los Sistemas de Producción Intervenidos

SECCIÓN	No PREGUNTA	PREGUNTAS	OPCIONES DE RESPUESTAS
Identificación del predio	1	Departamento	Meta, Vichada
	2	Municipio	Puerto López, Puerto Gaitán, Cumaribo
	3	Vereda	Texto
	4	Nombre de la finca	Texto
	5	Área total de la finca (ha)	Número
	6	Área con cultivos permanentes (ha)	Número
	7	Área con cultivos temporales (ha)	Número
	8	Área con sabana nativa (ha)	Número
	9	Áreas con Pastos Establecidos (ha)	Número
	10	Área con forestales (nativos / introducidos) (ha)	Número
	11	Área preservación ambiental/vegetación nativa (ha)	Número
	12	Ubicación georeferenciada (encuestador)	Coordenadas

Información del encuestado	13	Nombre y Apellidos (encuestado)	Texto
	14	Relación con el propietario	El mismo productor-propietario; Administrador, Otro
	15	Especifique cual otra relación tiene con el propietario	Texto
	16	¿Quién toma las principales decisiones de manejo de los sistemas de producción?	Propietario; Administrador; Otro
	17	Especifique que otra persona toma las decisiones	Texto
Información del Productor / Administrador	18	Nombre del productor - propietario/administrador	Texto
	19	Lugar de nacimiento (Municipio y Departamento)	Texto
	20	Edad (años)	Número
	21	ID del Productor - Propietario – Administrador	Número
	22	Lugar de residencia del productor - propietario / administrador	Predio; Otro
	23	Especifique en que otro lugar de residencia	Texto
	24	Cuanto tiempo de actividad como productor - propietario / administrador (años)	Número
	25	Experiencia como productor - propietario en la zona (años)	Número
	26	Nivel académico	Primaria incompleta; Primaria completa; Bachillerato incompleto; Bachiller; Técnico; Profesional; Posgrado; Otro
	27	Especifique que otro nivel académico tiene	Texto
28	Tenencia de la tierra	Propia; Arrendada, Otra	
29	Especifique que otro tipo de tenencia de tierra	Texto	
Inform. Trabajador	30	Número de trabajadores (MUJERES) permanentes	Número
	31	Número de trabajadores (MUJERES) temporales - jornaleros	Número
	32	Número de trabajadores (HOMBRES) permanentes	Número
	33	Número de trabajadores (HOMBRES) temporales – jornaleros	Número

Historia del predio	34	Realiza análisis de suelos?	Sí; No
	35	Con que frecuencia?	Semestral; Anual; Otro
	36	Especifique cual otra frecuencia utiliza para el análisis de suelos	Texto
	37	Historia del predio	Repetir para cada lote
	38	Número del lote	Número
	39	Uso (especie)	Sabana nativa; Pastos mejorados; Brachiaria; Caucho; Palma Caña; Descanso, Bosque natural; Arroz; Maíz; Sorgo; Soya; Otro.
	40	Especifique cual otro uso (especie)	Texto
	41	Año de cultivo (permanente)	1990-1995;1996-1999; 2000-2004; 2005;2006;2007;2008;2009;2010;2011; 2012
	42	Año de cultivo (temporales)	1990-95;96-99; 2000-2004;2005A;2015B; 2006A ; 2006B;2007A;2007B;2008A;2008B;2009A;2009 B; 2010 A; 2010B;2011 A; 2011B;2012A; 2012B
	43	Área (ha)	Número
	44	Rendimiento	Número para: Maíz, Arroz, Soya, Caña (t/ha); Caucho (kg/ha); Pasturas, Sabana (animales/ha); Forestales (m ³ /ha)
Aplicación de Correctivos	45	Aplica correctivos para la acidez del suelo?	Sí; No
	46	Nombre los correctivos que ha aplicado en la finca	Repetir para cada cultivo y correctivos
	47	Seleccione los cultivos que ha sembrado en ésta finca (principales)	Arroz, Maíz; Soya; Sorgo; Caucho; Pasturas mejoradas; Palma; Caña; Forestales; Otros
	48	Especifique cual otro cultivo	Texto
	49	Seleccione un correctivo	Cal Dolomita, Roca fosfórica; Yeso; Calfos (escorias); Otro
	50	Especifique cual otro correctivo utiliza	Texto
	51	Modo de aplicación	Boleadora; Encaladora ; Otros
	52	Especifique que otro modo de aplicación utiliza	Texto
	53	Modo de Incorporación	Rastra; Cincel; Otros
54	Especifique que otro modo de incorporación utiliza	Texto	

Aplicación de Correctivos	55	Desde cuando lo utiliza? (año)	Número
	56	Quien hizo la recomendación?	Asistente técnico particular (asesor); Asistente técnico municipal; Recomendación Ica; Recomendación Corpoica; Técnico de asociación; Vecino, Amigo o Familiar; Distribuidor de insumos; Otro
	57	Especifique cual otra persona hizo la recomendación	Texto
	58	Que dosis aplicó? (Ton/ha)	Número
	59	Lo utiliza actualmente?	Sí; No
	60	Cada cuánto lo aplica? (meses)	Número
	61	Hasta cuando lo utilizó? (año)	Número
	62	Por qué motivo no lo utiliza ahora?	Alto costo, No es efectivo; Es difícil de realizar; No hay disponibilidad de equipos; Afecta el suelo; No se requiere de acuerdo al análisis de suelos; Otro
	63	Especifique por cual otro motivo no lo utiliza ahora	Texto
Labranza	64	Usted prepara el suelo?	Sí ; No
	65	Información de labranza	Repetir para cada uno de los lotes o años
	66	Seleccione un cultivo (principales)	Arroz; Maíz; Soya; Sorgo; Caucho; Pasturas mejoradas; Palma; Caña; Forestales; Maíz ensilaje; Otros
	67	Especifique cual otro cultivo	Texto
	68	Seleccione un tipo de labranza	Arado de discos; Arado de vertedera; Arado de Cincel; Rastra; Siembra directa; Quema (Fuego); Quema (herbicida)
	69	Desde cuándo lo utiliza? (Año, Semestre)	Número
	70	Quien hizo la recomendación?	Asistente técnico particular (asesor); Asistente técnico municipal; Recomendación Ica; Recomendación Corpoica; Técnico de asociación; Vecino, Amigo o Familiar; Distribuidor de insumos; Otro
	71	Especifique cual otra persona hizo la recomendación	Texto
	72	Numero de pases	Número
	73	Dosis / ha (Its)	Número
	74	Lo utiliza actualmente?	Si; No

	75	Hasta cuando lo utilizó? (Año)	Número
Labranza	76	Por qué motivo no lo utiliza ahora?	Alto costo, No es efectivo; Es difícil de realizar; No hay disponibilidad de equipos; No hay disponibilidad de herbicida; afecta el Suelo; Otro
	77	Especifique por cual otro motivo no lo utiliza ahora	Texto
	78	Sección Material Genético	Repetir para cada uno de los cultivos
	79	Seleccione un cultivo (principales)	Arroz, Maíz; Soya; Sorgo; Caucho; Pasturas mejoradas; Palma; Caña; Forestales;
	80	Relacione los materiales genéticos que utiliza o haya utilizado (variedad - híbrido) para Arroz	Llanura 11; Línea 30; Sabana 30; Sabana 10; FEDEARROZ 173; FEDEARROZ 174; FEDEARROZ 60; FEDEARROZ 757; Panorama; Laguna; Aceituno 2540; Otro
	81	Especifique cual otro material genético utiliza o utilizó para Arroz	Texto
	82	Relacione los materiales genéticos que utiliza o haya utilizado (variedad - híbrido) para Maíz	H-108;H-111; 30K 73 - HR PIONEER; 30K 73 PIONEER; IMPACTO; DKLAB 777;DKLAB 4374; Otro
	83	Especifique cual otro material genético utiliza o utilizó para Maíz	Texto
	84	Relacione los materiales genéticos que utiliza o haya utilizado (variedad - híbrido) para Soya	Libertad 4; Cimarrona; Panorama 24; SB 89; Panorama 29; Taluma 5; Superior 6; Sabana 7; Ariari; Orinoquia 3; Altillanura 2; P-34; Línea 1426; Kamerum SK5; Kamerum SK7; Panorama 27; ICA J96; Otro
	85	Especifique cual otro material genético utiliza o utilizó para Soya	Texto
	86	Relacione los materiales genéticos que utiliza o haya utilizado (variedad - híbrido) para Caucho	RRIM 600; FX3864; IAH 873; IAH 710; Pb 260; Otro
	87	Especifique cual otro material genético utiliza o utilizó para Caucho	Texto
	88	Relacione los materiales genéticos que utiliza o haya utilizado (variedad - híbrido) para Pastos mejorados	Tanzania; Toledo; Humidicola; Mombaza; Decumbens; Mulato; Brizantha; Estrella; Llanero; Kudzu; Maní forrajero; Maquenque; Capica; Otro

	89	Especifique cual otro material genético utiliza o utilizó para Pastos	
	90	Relacione los materiales genéticos que utiliza o haya utilizado (variedad - híbrido) para Palma	DURA; PISIFERA; TENERA; HIBRIDOS; MONTELIBANO; ASD COSTA RICA; IRHO; UNIPALMA; ICA; LAS FLORES; CIRAD; Otro
	91	Especifique cual otro material genético utiliza o utilizó para Palma	Texto
	92	Relacione los materiales genéticos que utiliza o haya utilizado (variedad - híbrido) para Caña	CC; PR; RD; Otro
	93	Especifique cual otro material genético utiliza o utilizó para Caña	Texto
Labranza	94	Relacione los materiales genéticos que utiliza o haya utilizado (variedad - híbrido) para Forestales	Eucalipto; Acacia; Melina; Yopo; Pino Caribe; Pino; Otro
	95	Especifique cual otro material genético utiliza o utilizó para Forestales	Texto
	96	Quien hizo la recomendación?	Asistente técnico particular (asesor); Asistente técnico municipal; Recomendación Ica; Recomendación Corpoica; Técnico de asociación; Vecino, Amigo ó Familiar; Distribuidor de insumos; Otro
	97	Especifique cual otra persona hizo la recomendación	Texto
	98	Rendimiento	Rendimiento t/ha; Animales/ha (pasturas)
	99	Lo utiliza actualmente?	Sí; No
	100	¿Hasta cuándo lo utilizó? (Año)	Número
	101	Por qué motivo no lo utiliza ahora?	Alto Costo; Bajo rendimiento; Mala calidad comercial; No hay disponibilidad de semilla; Susceptible a plagas y enfermedades; Otro
	102	Especifique por cual otro motivo no lo utiliza ahora	Texto

Fertilizantes	103	Uso de Fertilizantes	Repetir para cada cultivo y fertilizantes
	104	Seleccione un cultivo (principales)	Arroz, Maíz; Soya; Sorgo; Caucho; Pasturas mejoradas; Palma; Caña; Forestales; Otro
	105	Especifique cual otro cultivo	Texto
	106	Nombre del fertilizante (principales)	Fertilizante compuesto N-P-K (Diferentes fórmulas); Fertilizante compuesto N-P-K-S (Diferentes fórmulas); Urea; Superfosfato triple; DAP; Cloruro de potasio; Nitrato de potasio; Sulfato de amonio; Sulfato de potasio; Fertilizante foliar compuesto; Compuesto de elementos menores; Boro Zinc; Cobre; Magnesio; Humus; Gallinaza; Otro abono orgánico; PIN MAIZ; PIN ARROZ; Rafos; Sulfato de calcio – Yeso; Sulcamag; PIN SOYA; Otro
	107	Especifique cual otro abono orgánico	Texto
	108	Especifique cual otro fertilizante	Texto
	109	Desde cuando lo utiliza? (año)	Número
Fertilizantes	110	Quien hizo la recomendación?	Asistente técnico particular (asesor); Asistente técnico municipal; Recomendación Ica; Recomendación Corpoica; Técnico de asociación; Vecino, Amigo ó Familiar; Distribuidor de insumos; Otro
	111	Especifique cual otra persona hizo la recomendación	Texto
	112	Dosis por hectárea (kilos/ha)	Número
	113	Lo utiliza actualmente?	Sí; No
	114	Hasta cuando lo utilizó? (Año)	Número

	115	Por qué motivo no lo utiliza ahora?	Alto Costo; Baja eficiencia; Mala calidad comercial; No hay disponibilidad del fertilizante; Difícil de aplicar; Otro
	116	Especifique por cual otro motivo no lo utiliza ahora	Texto
Control de malezas	117	Hace control de malezas?	Sí; No
	118	Control de malezas	Si
	119	Seleccione un cultivo (principales)	Arroz, Maíz; Soya; Sorgo; Caucho; Pasturas mejoradas; Palma; Caña; Forestales; Otros
	120	Especifique cual otro cultivo	Texto
	121	Método de control	Químico; Mecánico; Combinado
	122	Especifique cual otro método de control	Texto
	123	Cual producto químico usa (Soya)	Ágil; Cletodin; Dual; Flex; Glifosato; Glifosato y monocrotofos; Glifosato y sencor; Harnnes; Pantera; Prowl; Select; Select y flex; Sencor; Sencor y dual; Verdi y flex; Otro
	124	Especifique cual otro herbicida utiliza	Texto
	125	Cual producto químico usa (Maíz)	2-4D Amina; Atrazina; Glifosato; Glifosato y amina; Glifosato y tronador; Harnnes; Propanil; Prowl; Prowl; Tordon; Otro
	Control de malezas	126	Especifique cual otro herbicida utiliza
127		Cual producto químico usa (Arroz)	2-4D Amina 720; Actril; Butaclor; Clincher y Tordon; Coultar; Glifosato; Roundup; Tordon; Tronador; Propanil; Otro
128		Especifique cual otro herbicida utiliza	Texto

	129	Cual producto químico usa (Pastos)	2-4D Amina; Matancha; Pastar; Potreron; Roundup; Tordon; Traver; Otro
	130	Especifique cual otro herbicida utiliza	Texto
	131	Cual producto químico usa (Caucho)	2-4D Amina 720; Ally; Glifosato; Grau moxone; Gramuron; Tordon; Otro
	132	Especifique cual otro herbicida utiliza	Texto
	133	Cual producto químico usa (Caña)	2-4D Amina; Agrotin; Ametrina; Karmex; Otro
	134	Especifique cual otro herbicida utiliza	Texto
	135	Cual producto químico usa (Palma)	Glifosato; Otro
	136	Especifique cual otro herbicida utiliza	Texto
	137	Cual producto químico usa (Forestales)	Glifosato; Otro
	138	Especifique cual otro herbicida utiliza	Texto
	139	Desde cuando lo utiliza? (año)	Número
	140	Quien hizo la recomendación?	Asistente técnico particular (asesor); Asistente técnico municipal; Recomendación Ica; Recomendación Corpoica; Técnico de asociación; Vecino, Amigo ó Familiar; Distribuidor de insumos; Otro
	141	Especifique cual otra persona hizo la recomendación	Texto
	142	Lo utiliza actualmente?	Sí; No
	143	Hasta cuando lo utilizó? (Año)	Número
	144	Por qué motivo no lo utiliza ahora?	Alto Costo; Baja eficiencia; Mala calidad comercial; No hay disponibilidad del herbicida; Difícil de aplicar; Otro
	145	Especifique por cual otro motivo no lo utiliza ahora	Texto
Manejo	146	Sección Manejo Plaga y Enfermedades	Repetir para cada cultivo/ sus plagas y enfermedades

Plag / Enfer	147	Seleccione un cultivo (principales)	Arroz, Maíz; Soya; Sorgo; Caucho; Pasturas mejoradas; Palma; Caña; Forestales; Otros
	148	Especifique cual otro cultivo	Texto
Manejo de Plagas y Enfermedades	149	Nombre de la plaga o enfermedad (Principales) para Maíz	Cogollero; Barrenador; Chinche; Cucarron; Mal de asfalto, Otro
	150	Especifique cual otra plaga o enfermedad para Maíz	Texto
	151	Nombre de la plaga o enfermedad (Principales) para Soya	Trozadores; Perforadores de follaje; Comedores de follaje, Perforadores de vainas; Chupadores de vainas; Hormigas, Pudrición de raíces y tallos, Mancha de ojo de rana, Madura biche; Añublos y pudriciones; Rhizoctoniasis; Otro
	152	Especifique cual otra plaga o enfermedad para Soya	Texto
	153	Nombre de la plaga o enfermedad (Principales) para Arroz	Hongo Magnaporthe grisea; Helminthosporiosis;; Virus de la hoja blanca; Manchado de grano; Escaldado; Spodoptera frugiperda Diatraea saccharalis; Cucarron; Hormiga; Otro
	154	Especifique cual otra plaga o enfermedad para Arroz	Texto
	155	Nombre de la plaga o enfermedad (Principales) para Caucho	Comején; Gusano cachón; Venado; Microcyclus ulei; Phytophthora palmivora; Otro
	156	Especifique cual otra plaga o enfermedad para Caucho	Texto
	157	Nombre de la plaga o enfermedad (Principales) para Pastos	Mion de los pastos; Hormigas; Chinchas; Gusano ejercito; Otro
	158	Especifique cual otra plaga o enfermedad para Pastos	Texto
	159	Nombre de la plaga o enfermedad (Principales) para Palma	Gusano cabrito; Gusano túnel; Gusano monturita; Gusano cipres; Gusano canasta; Picudo de la palma; Strategus aloeus; Ratas; Taltuzas; Antracnosis; Arqueo foliar; Pudrición del cogollo; Pestalotiopsis, Anillo rojo; Podredumbre basal, Otro
	160	Especifique cual otra plaga o enfermedad para Palma	Texto
	161	Nombre de la plaga o enfermedad (Principales) para Caña	Barrenador diatraea; Picudo; Cucarrón; Barrenador gigante; Gusano cabrito; Hormiga loca; Termitas; Pudrición roja; Mal de piña

	162	Especifique cual otra plaga o enfermedad para Caña	Texto
	163	Nombre de la plaga o enfermedad (Principales) para Forestales	Descortezadores; Defoliadores; Barrenadores; Cogolleros; Plantas parásitas; Hongos; Bacterias; Virus; Nematodos; Otros
	164	Especifique cual otra plaga o enfermedad para Forestales	Texto
Manejo de plagas y enfermedades	165	Qué tipo de control utiliza?	Químico; Biológico; Trampas; Cultural; Otros
	166	Especifique que otro tipo de control utiliza	Texto
	167	Nombre del producto	Texto
	168	Desde cuando lo utiliza? (Año)	Número
	169	Quien hizo la recomendación?	Asistente técnico particular (asesor); Asistente técnico municipal; Recomendación Ica; Recomendación Corpoica; Técnico de asociación; Vecino, Amigo ó Familiar; Distribuidor de insumos; Otro
	170	Especifique cual otra persona hizo la recomendación	Texto
	171	Lo utiliza actualmente?	Sí; No
	172	Hasta cuando lo utilizó? (Año)	Número
	173	Por qué motivo no lo utiliza ahora?	Alto Costo; Baja eficiencia; Mala calidad comercial; No hay disponibilidad del producto; Difícil de aplicar; Otro
	174	Especifique por cual otro motivo no lo utiliza ahora	Texto
Pastoreo	175	Tiene ganadería?	Sí; No
	176	Manejo de Pastoreo	Si tiene ganadería
	177	Tipo de pastoreo que utiliza	Continuo; Alterno; Rotacional; En franjas; Otro
	178	Especifique que otro tipo de pastoreo	Texto
	179	Desde cuando lo utiliza? (año)	Número
	180	Quien hizo la recomendación?	Asistente técnico particular (asesor); Asistente técnico municipal; Recomendación Ica; Recomendación Corpoica; Técnico de asociación; Vecino, Amigo ó Familiar; Distribuidor de insumos; Otro
	181	Especifique cual otra persona hizo la recomendación	Texto

	182	Capacidad de carga	Número
	183	Lo utiliza actualmente?	Sí; No
	184	Hasta cuando lo utilizó? (Año)	Número
	185	Por qué motivo no lo utiliza ahora?	Alto costo; Baja eficiencia; Mala calidad de pasturas; Pocos número de animales; Difícil de manejar; Otros
Pastoreo	186	Especifique por cual otro motivo no lo utiliza ahora	Texto
	187	Usted hace renovación de pastos	Sí; No
	188	Especie de pasto que ha renovado	Tanzania; Toledo; Humidicola; Mombaza; Decumbens; Mulato; Brizantha; Estrella; Llanero; Kudzú; Maní forrajero; Maquenque; Capica; Brachiaria, Pastos de corte; Alfalfa; King grass; Imperial; Otro
	189	Especifique cual otra especie de pasto ha renovado	Texto
	190	Desde cuándo renueva? (año)	Número
	191	Quien hizo la recomendación?	Asistente técnico particular (asesor); Asistente técnico municipal; Recomendación Ica; Recomendación Corpoica; Técnico de asociación; Vecino, Amigo ó Familiar; Distribuidor de insumos; Otro
	192	Especifique cual otra persona hizo la recomendación	Texto
	193	Con que frecuencia renueva?	Cada 5 años; Cada 10 años; Cada 15 años; Otros
	194	Especifique con cual otra frecuencia renueva los pastos	Número
	195	Renueva actualmente?	Si; No
	196	Hasta cuándo renovó? (año)	Número
	197	Por qué motivo no renueva ahora?	Alto costo; Baja eficiencia; Buena calidad de las pasturas; Susceptibilidad a plagas y enfermedades; Difícil de manejar; Otros
	198	Especifique por cual otro motivo no renueva ahora	Texto
	199	Razas de ganado	Se debe repetir para cada raza de ganado
	200	Seleccione una Raza de ganado que ha tenido (principales)	Brahman; Nelore; Angus; Brangus; Pardo suizo; Limousin; BON; San martinero; Costeño con cuernos; Cruces sin especificar; Otra raza criolla;
201	Especifique cual otra raza criolla	Texto	

	202	Especifique cual otra raza	Texto
	203	Desde cuando la introdujo? (año)	Número
Pastoreo	204	Quien hizo la recomendación?	Asistente técnico particular (asesor); Asistente técnico municipal; Recomendación Ica; Recomendación Corpoica; Técnico de asociación; Vecino, Amigo ó Familiar; Distribuidor de insumos; Otro
	205	Especifique cual otra persona hizo la recomendación	Texto
	206	Tipo de producción	Leche; Carne de levante; Carne de Ceba; Doble propósito; Cría; Otro
	207	Especifique que otro tipo de producción maneja	Texto
	208	Tiene esa raza actualmente?	Sí; No
	209	Hasta cuando la tuvo? (año)	Número
	210	Por qué motivo la cambió?	Alto costo; Baja eficiencia; Baja eficiencia de producción; Mala adaptación de los animales; Susceptibilidad a plagas y enfermedades; Difícil de manejar; Otro
	211	Especifique por cual otro motivo la cambió?	Texto
Razones de Adopción	212	Sección Razones de adopción	Repetir para cada uno de los cultivos
	213	Seleccione un cultivo (principales)	Arroz, Maíz; Soya; Sorgo; Caucho; Pasturas mejoradas; Palma; Caña; Forestales; Otros
	214	Especifique cual otro cultivo	Texto
	215	Indique por cuales razones decidió incorporar el cultivo	Expectativa de alta rentabilidad; Inversión de bajo riesgo; Fácil comercialización; Posibilidad de transformarla en producto de mayor valor; Recuperación rápida de la inversión; Expectativa de valorización del terreno; Expectativa de valorización del terreno; Disponibilidad de crédito Finagro; Incentivos de Capitalización Rural; Incentivo Forestal; Exención de impuestos; Otra
	216	Especifique cual otra razón	Texto
	217	Usted ha recibido capacitación en temas agrícolas y relacionados?	Sí; No
	218	Sección Capacitación	Repetir para cada capacitación

10. Bibliografía

Achkar, M., Canton, V., Cayssials, R., Domínguez, A., Fernández, G. y F. Pesce. (2005). Indicadores de sustentabilidad. Comisión Sectorial de Educación Permanente. DIRAC, Facultad de Ciencias. Montevideo. 104pp.

Acton, D.F., Padbury, G.A. (1993). A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M. and Gupta, V.V.S.R. (eds.). 1997. Biological indicators of soil health. Cab International, Oxon, Uk. 1 – 23.

Amézquita, E. (1994). Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos En: F. Silva (Ed.). Fertilidad de Suelos: Diagnóstico y Control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Santafé de Bogotá, 137-154.

Amézquita, E. (1999). Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. *Revista Palmas*, 20(1), 73-86.

Anderson, J.P.E. and Ingram, J.S.I. (1993). Tropical soil biology and fertility. A Handbook of methods. CAB international. Oxon, Uk, pp 44, 46.

Anonimo. (s.f). estudio de factibilidad para la instalación de una empresa productora y exportadora de caracoles comestibles de tierra. 140. Consultado en: <https://es.scribd.com/document/74108963/TESIS-CARACOLES-1>

Arandia, A., M. Intxaurrendieta, J., M. Mangado, J., Pinto, M., Hierro, O., & Santamaría, P. (2008). Incorporación de indicadores sociales y ambientales a los programas de gestión técnico – económica de explotaciones agrarias en navarra y la CAV. 16. Publicado en: <https://www.researchgate.net/publication/242276572>

Azqueta Oyarzun, D. (1994) Valoración económica de la calidad ambiental, McGraw-Hill, Madrid.

- Bai, Z.G., D.L. Dent, L. Olsson, and M.E. Schaepman. (2008).** Global assessment of land degradation and improvement 1. Identification by remote sensing: GLADA Report 5. LADA, World soil information & FAO. Wageningen.
- Blanchart, E., Albrecht, A., Alegre, J., Duboisset, A., Gilot, C., Pashanasi, B., Lavelle, P., Brussaard, L. (1999).** Effects of earthworms on soil structure and physical properties. In: Lavelle, P., Brussaard, L., Hendrix, P. (eds.). 1999. Earthworm management in tropical agroecosystems. CAB International. Oxon, Uk. 149 – 172.
- Blouin, M., Zuily-Fodil, Y., Pham-Thi, A.T., Laffray, D., Reversat, G., Pando, A., Tondoh, J., Lavelle, P. (2005).** Belowground organism activities affect plant aboveground phenotype, inducing plant tolerance to parasites. *Ecol Lett* 8,202-208.
- Bohlen, P.J., Edwards, W.M., Edwards, C.A. (1995).** Earthworm community structure and diversity in experimental agricultural watersheds in Northeastern Ohio. *Plant Soil* 170, 233-239.
- Bravo, C., & Florentino, A. (1997).** Efecto de diferentes sistemas de labranza sobre las propiedades físicas del suelo y su influencia sobre el rendimiento del algodón. *Bioagro*, 9(3), 67-75.
- Brown, G.G., Pashanasi, B., Villenave, C., Patrón, J.C., Senapati, B.K., Giri, S., Barois, I., Lavelle, P., Blanchart, E., Blakemore, R.J., Spain, A.V., Boyer, J. (1999).** Effects of earthworms on plant productions in the tropics. In: Lavelle, P., Brussaard, L., Hendrix, P. (eds.). 1999. Earthworm management in tropical agroecosystems. CABI Publishing. London, Uk.
- Brussaard, L. (1997).** Biodiversity and Ecosystem Functioning in Soil, *Ambio*, Vol. 26, No. 8 (Dec., 1997), pp. 563-570
- Camacho-Tamayo, J. H., Luengas-Gómez, C., & Leiva, F. R. (2010).** Análisis multivariado de propiedades químicas en Oxisoles con diferentes niveles de intervención agrícola. *Acta Agronómica*, 59(3), 273.

- Campanhola C; Voss J. (2004).** Prologue. En: Guimarães EP; Sanz JI; Rao IM; Amézquita MC; Amézquita E; Thomas RJ, eds. Agropastoral systems for the tropical savannas of Latin America. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília, DF, Brasil. p ix.
- Carles, J., Avellá, L. y García, M. (1998).** “Precios, costos y uso del agua en el regadío mediterráneo”. Comunicación presentada al Congreso Ibérico sobre gestión y planificación de agua. 231-256. Zaragoza.
- Casas, R. (2006).** “La oportunidad de preservar la calidad y la salud de los suelos”. En suplemento agropecuario del diario La Nación, Buenos Aires. 29 de mayo
- Castaño, E. y Moreno, H. (1994).** Cuantificación de Variables Cualitativas y Análisis de Componentes Principales. En: Memorias Simposio de Estadística. Análisis Multivariado de Datos. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Matemáticas y Estadística. Santafé de Bogotá. D.C.
- CEBDS. (2003).** Guia da produção mais limpa faça você mesmo. Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável, Río de Janeiro, 55 p. Disponible en <http://www.pmaisl.com.br/publicacoes/guia-da-pmaisl.pdf>
- Chu, H., Y. Hosen, and K. Yagi. (2007).** NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes in winter barley field of Japanese Andisol as affected by N fertilizer management. Soil Biology & Biochemistry 39:330-339.
- CIAT – Centro Internacional de Agricultura Tropical. (2012).** Ciencia para la competitividad y sostenibilidad de la agricultura Colombiana, Una vision de eco-eficiencia folleto, Mayo de 2012.
- CIAT – Centro Internacional de Agricultura Tropical. (2012).** Ciencia, Tecnología e Innovación. El futuro de la Orinoquia. Convenio MADR – CORPOICA – CIAT. Avances, logros y retos, Desafíos futuros, Innovación para el mejoramiento de la competitividad de la Altillanura Colombiana, Escenarios para el manejo ecoeficiente del territorio, Modelo para evaluar los riesgos del cambio climatico y generar estrategias de adaptación y mitigación, folleto, Junio de 2012.

- Conen, F. and Smith, A. (1998).** A re-examination of closed flux chamber methods for the measurement of trace gas emissions from soils to the atmosphere. *European Journal of soil Science* 49. Pp. 701-707.
- Curry, J.P. (1994).** Grassland invertebrates. Ecology, influence on soil fertility and effects on plant growth. Chapman and Hall, London, 437 pp. In: Pankhurst, C., Doube, B.M and Gupta, V.V.S.R. (eds.). *Biological Indicators of soil Health*. Cab International, Oxon, Uk. pp 266.
- Dávila, A. D., Livio, H. R., Shinzato, M. D. (2006).** Estimación de la ecoeficiencia y el desempeño ambiental en la industria azucarera del Perú. Informe final del Instituto de Investigación & Desarrollo. www.infoindustriaperu.com.
- De Ruiter, P. C., Neutel, A. – M. and Moore, J. C. (1998).** Biodiversity in soil ecosystems: the role of energy flow and community stability. *Appl. Soil Ecol.*, 10, 217 – 228.
- Decaëns, T. (2010).** Macroecological patterns in soil communities. *Global Ecology and Biogeography* 19, 287 – 302.
- Decaëns, T., Jiménez, J. J., Rangel, A. F., Cepeda, A., Moreno, A. G., & Lavelle, P. (2001).** La macrofauna del suelo en la sabana bien drenada de los Llanos Orientales. *La misión del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) es reducir el hambre y la pobreza en los trópicos mediante una investigación colaborativa que mejore la productividad agrícola y el manejo de los recursos naturales. El CIAT es uno de los 16 centros internacionales de investigación agropecuaria, conocidos ya como los Centros de la Cosecha del Futuro, que son auspiciados por el Grupo Consultivo para la*, 111.
- Decaëns, T., Mariani, L., Lavelle, P. (1999).** Soil surface macrofaunal communities associated with earthworm cast in grasslands of the eastern plains of Colombia. *Applied Soil Ecology*. 13, pp 87 – 100.
- Díaz, S., Fargione, J., Chapin, F.S., Tilman, D. (2006).** Biodiversity loss threatens human well-being. *PloS Biology* 4: 1.300 - 1305.

- Diden, W.A.M. (2001).** Earthworm communities in grasslands and horticultural soils. *Biology and Fertility of Soils* 33, 111-117.
- Diouf M.N. (2003).** Les communautés fongiques des structures de récolte de plusieurs espèces de termites macrotermitinae: origine et évolution. Doctorate, Paris XII, 165 p.
- Domínguez Céspedes, H. D. (2017).** Estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo producidas por la quema controlada de vegetación en el municipio de Cumaribo, departamento del Vichada.
- Domínguez, J., Aira, M., Gómez-Brandón, M. (2009).** El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes. *Ecosistemas* 18(2):20-31.
- Donoso, G. (2005).** Valoración de los servicios ecosistémicos. *Revista ambiente y desarrollo*. Vol. XXI / N° 1: 96 – 97.
- Doran, J.W and Parkin, T.B. (1994).** Defining and assessing soil quality. *In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F. and Steward, B.A. (eds.). Defining Soil Quality for Sustainable Environment*. Soil Science Society of America Special Publication No. 35, Madison, Wisconsin. Pp. 3 – 21.
- Doube, B.M., Stephens, P.M., Davoren, C.W. and Ryder, M.H. (1994).** Interactions between Earthworms, beneficial soil microorganisms and root pathogens. *Applied soil Ecology* pp 1,3 10.
- Dray, S., Dufour, A. B. (2007).** [The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists](#). *Journal of Statistical Softwares*, 22, 1-20
- Edwards, C.A. and Bohlen, P.J. (1996).** *Biology and Ecology of Earthworms*. Chapman and Hall, London. *In: Pankhurst, C., Doube, B.M and Gupta, V.V.S.R. (eds.). Biological Indicators of soil health*. Cab International, Oxon, Uk, pp 266.
- Espada, C. J. L. (2013).** Los árboles frutales como sumideros de CO2 desempeñan un importante servicio ambiental. *Informaciones Técnicas*. Dirección General de Alimentación y Fomento Agroalimentario. Número 248. 12.

FAO. (2002). Organic Agriculture, environment and food security. World agriculture: towards 2015/2030.

Fitter A. H., Gilligan, C. A., Hollingworth, K., Kleckzowski, A., Twyman, R. M. and Pitchford, J. W. (2005). Biodiversity and ecosystem function in soil. *Functional Ecology*, 19, 369 – 377.

Fragoso, C., Brown, G.G., Patrón, J.C., Blanchart, E., Lavelle, P., Pashanasi, B., Senapati, B., Kumar, T. (1997). Agricultural intensification, soil biodiversity and Agroecosystemfunction in the tropics" the role of earthworms. *Applied Soil Ecology* 6 (1997) 17-35.

Frangi, J. L. and A. E. Lugo. (1985). Ecosystem dynamics of a subtropical floodplain forest. *Ecological Monographs* 55:351-369.

Friesen D; Thomas R; Rivera M; Asakawa N; Bowen W. (1998). Nitrogen dynamics under monocultures and crop rotations on a Colombian savanna Oxisol. En: Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science on CD-ROM. Association française pour l'étude du sol, Montpellier, Francia.

Friesen DK; Rao IM; Thomas RJ; Oberson A; Sanz JI. (1997). Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil* 196(2):289–294.

GOBERNACION DEL META Y INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI- IGAC. (2004). El Meta un territorio de oportunidades.

Goedkoop M. y Spriensma R. (2000). Ecoindicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology report. Spatial Planning and the Environment, Ministry of Housing. La Haya, Países Bajos, 132 p.

Goklany, I. M. (2002). *La globalización del bienestar humano*. Cato institute.

Gómez, J. (2010). Capítulo 16 Manejo del suelo en la Altillanura de los Llanos Orientales de Colombia. Producción eco-eficiente del arroz en América Latina, 279

Gregorich, E. G.; Carter, M. R.; Angers, D. A.; Monreal, C. M.; y Ellert, B. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74:367 - 385.

Grimaldi, M., Sarrazin, M., Chauvel, A., Luizao, F., Nunes, N., Lobato Rodriguez, M. R., Amblard, P. and Tessier, D. (1993). Effets de la déforestation et des cultures sur la estructura des sols argileux d'Amazonie brésilienne. *Cahiers Agriculture*, 2, 36 – 47.

<http://ciat->

[library.cgiar.org:8080/jspui/bitstream/123456789/5626/1/eco_eficiencia_d_e_la_vision_a_la_realidad_folleto.pdf](http://ciat-library.cgiar.org:8080/jspui/bitstream/123456789/5626/1/eco_eficiencia_d_e_la_vision_a_la_realidad_folleto.pdf)

<http://ciat->

[library.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca/Sistemas_Agropastoriles.pdf](http://ciat-library.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca/Sistemas_Agropastoriles.pdf)

IAEA. (1992). INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Procedure for Conducting Human Reliability Analysis in Probabilistic Safety Assessment, IAEA-TECDOC, Vienna (1992).

IBOY. International Biodiversity Observation Year. (2001 – 2002). Project soil Macrofauna: Endangered resource in a changing world. Available in: <http://www.bondy.ird.fr/lest/IBOY>

IGAC – CORPOICA. (2002). Zonificación de los conflictos de uso de la tierra en Colombia. Capítulo 1. Zonificación Agro-ecológica de Colombia.

IGAC- INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Meta, a escala 1:100.000.

IGAC- INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. (2006). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Editado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Sexta edición.

Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Río de Janeiro, 3 a 14 de junio de 1992. (publicación de

las Naciones Unidas, número de venta: S.93.I.8 y correcciones), vols. I a III.

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. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs

Janzen, H. H. (2004). Carbon cycling in earth systems – a soil science perspective. *Agriculture ecosystems & environment*, 104, 399 – 417.

Jeffrey, D.W., Maddend, B. (1991). Bioindicators and environmental management. Academic Press, London, pp 458. In: Paoletti, M.G. (ed.). 1999 *Agriculture, ecosystems and environment*. Elsevier science B.V. pp1 – 18.

Jones, P.G., W.S. Diaz y J. Cock. (2004). Homologue v1.0. CD-ROM. CIAT, Cali, Colombia.

Jumilla, F. V., Costa. G, I., Castro. C, T., García. C, R., Romojaro. C, C.... Castillo. N, L. M. (2010). Etiquetado de carbono en las explotaciones y productos agrícolas. la iniciativa agricultura murciana como sumidero de CO₂. Consejería de Agricultura y Agua. Región de Murcia. 316.

Lal, R. (1994). Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. USDA - The Ohio State University. SMSS (Technical Monograph No. 21).

Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304 no. 5677 pp. 1623-1627.

Lal, R. (2010). Enhancing eco-efficiency in agro-ecosystems through soil carbon sequestration. *Crop Science* 50:S-120 – S-131.

Larson, W.E and Pierce, F.J. (1991). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M. and Gupta, V.V.S.R. (eds.). 1997. *Biological indicators of soil health*. Cab International, Oxon, Uk. pp 1 - 23.

- Lavelle, P. (1988).** Earthworms activities and soil system. Biology and fertility of soil 6, 237 – 251. In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M. and Gupta, V.V.S.R. (eds.). 1997. Biological indicators of soil health. Cab International, Oxon, Uk. pp 266.
- Lavelle, P. (1997).** Faunal activities and soil processes: Adaptative strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological research* 24, 93 – 132.
- Lavelle, P. (2010).** Programme agriculture et développement durable 2 éme edition colloque final 2 et 3 décembre.
- Lavelle, P. (2012).** Territorios ecoeficientes para una agricultura rentable, equitativa y sostenible [diapositivas]. *Seminario Agroecológico: Ciencia, Encuentros y Saberes*, 7.
- Lavelle, P. Decaëns T.; Aubertb, M.; Barota, S.; Blouina, M.; Bureaub, F.; Margerieb, P.; Moraa, P.; Rossic J. P. (2010).** Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology* 42 (2006) S3–S15.
- Lavelle, p., Barros, E., Blanchart, E., Brown, G., Desjardins, T., Mariani, L., Rossi, J.P. (2001).** SOM management in the tropics: Why feeding the soil macrofauna?. *Nutrient cycling in agroecosystems*. 61, pp 53 – 61.
- Lavelle, P., Bignell D. E., Austen, M. C., Brown, V. K., Behan-Pelletier, V., Garey, J. R., Giller, P. S., Hawkins, S. J., Brown, G. G., ST Jhon, M., Hunt, H. W. and Paul, E. A. (2004a).** Connecting soil and sediment biodiversity: The role of scale and implications for management. *Sustaining biodiversity and ecosystem services in soil and sediments*, 64, 193 – 224.
- Lavelle, P., Charpentier, F., Villenave, C., Rossi, J. P., Derouard, L., Pashanasi, B., ... & Bernier, N. (2004).** Effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics at a landscape scale over decades. *Earthworm Ecology. CRC Press, Boca Raton*, 145-160.
- Lavelle, P., Rodríguez, N., Arguello, O., Bernal, J., Botero, C., Chaparro, P. Gómez, Y., Gutiérrez, A., Hurtado, M., Loaiza, S., Rodríguez, E., Sanabria, C., Velásquez, E., Fonte, S. & Pullido, S. X. (2014).** Soil ecosystem services and

land use in the rapidly changing Orinoco River Basin of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 185, 106-117.

Lavelle, P., Spain, A. (2001). Soil Ecology. Kluwer Scientific Publications, Amsterdam, The Netherlands, 651pp.

Lavelle, P.; Fragoso, C. (2000). The IBOY-Macrofauna project. Report of an international workshop held at Bondy (France) 19-23 June 2000. IRD, Bondy, France. <http://www.bondy.ird.fr/lest/iboy/workshop-report.pdf>

Lavelle. (2002). Functional domains in soils. *Ecological Research* 17:441-450.

Leal J. (2005). [Ecoeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias NU. CEPAL | PNUD | NU. CEPAL. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos.](#) fecha de publicación: 2005-09 Serie: [Serie Medio Ambiente y Desarrollo](#) No. 105 82 p.: gráfs., tabs. Símbolo ONU: [LC/L.2352-P.](#)

Lee K.E., and Wood T.G. (1971). Physical and chemical effects on soil of some Australian termites and their pedological significance. *Pedobiologia* 11: 376 – 409.

Lee, K.E., and Foster, R.C. (1991). Soil fauna and soil structure. *Australian journal of soil research* 29, pp 745 – 775.

Lehni, M. (2000). Ecoeficiencia: creando valor con menos impacto. *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*, 6.

Linder, H. P., & Midgley, J. J. (1994). Taxonomy, compositional biodiversity and functional biodiversity of fynbos. *South African Journal of Science*, 90(6), 329-332.

López A. y Torres Y. (2001). Modelo de ecoindicadores para el sector PyME en Colombia. PROPEL Bogotá, Colombia, 48 p. Disponible en: <http://www.consultoraseb.com.ar/images/leyes/MODELO%20DE%20ECOINDICADORES.pdf>.

- López-Hernández D; Hernández-Hernández RM; Brossard M. (2005).** Historia del uso reciente de tierras de las sabanas de América del Sur: Estudios de casos en sabanas del Orinoco. *Interciencia* 30(10):623–630.
- MacDicken, K.G. (1997).** A Guide to Monitoring Carbon storage in Forestry and Agroforestry projects. Winrock International Institute for Agricultural Development.
- Mando, A., and R. Miedema. (1997).** Termite – induced change in soil structure after mulching degraded (crusted) soil in the Sahel. *Appl Soil Ecol* 6: 241 – 249.
- Manly, B. F. (2006).** Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology (Vol. 70). CRC Press.
- Maraun, M., Alpehi, J., Bonkowski, M., Buryr, R., Migge, S., Peter, M., Schaefer, M., Scheu, S. (1999).** Middens of the earthworm *lumbricusterrestris* (Lumbricidae) microhabitats for micro and mesofauna in forest soil. *Pedobiologia* 43: 276 – 287.
- Martín, A. (1991).** Short and long – term effects of the endogeic earthworm *Milsoniaanomala* (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter. *Biol. Fértil Soil.* 11, pp 234 – 238. In Lavelle, P., Barros, E., Blanchart, E., Brown, G., Desjardins, T. Orozco, O. 2003. Uso de la simulación para la comparación y selección de índices de diversidad. Tesis de maestría. Colegio de postgraduados, Institución de enseñanza e Investigación en Ciencias agrícolas. Instituto de Socio-economía, estadística e informática programa en estadística.
- Martínez, A.F., Quintero, H., Fragoso, C.E. (2006).** Earthworm communities in forest and pastures of the Colombian Andes. *Caribbean Journal of Science* 42, 301-310.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005.** Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis. World Resources Institute, Washington. DC. 80.
- Michelsen O., Fet A. M. y Dahlsrud A. (2006).** Ecoefficiency in extended supply chains: A case study of furniture production, *J. Environ. Manag.* 79, 290–297.
- Montes Vázquez, J. (2008).** Ecoeficiencia: una propuesta de responsabilidad ambiental empresarial para el sector financiero colombiano, Tesis de

grado, Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 88 p.

Montes, C. (2007). Del desarrollo sostenible a los servicios de los ecosistemas. *Ecosistemas* 16 (3): 1-3. Septiembre 2007. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=513>.

Muro Orozco, O. (2003). Uso de la simulación para la comparación y selección de índices de diversidad: caso: índice de Shannon H'vs índice a de Fisher.

Nakaniwa C. (2004). Ecoefficiency Indicator Handbook for Products. Japan Environmental Management Association for Industry (JEMAI), Tokio, Japón, 25 p. Disponible en: <http://www.jemai.or.jp/JEMAI/DYNAMIC/data/current/detailobj-2073-attachment.pdf>.

NRTEE (2001). *Calculating Ecoefficiency Indicators: A Workbook for Industry*, The National Round Table on the Environment and the Economy, Ottawa, Ontario, Canadá, 59 p.

Oberson A; Friesen DK; Rao IM; Buhler S; Frossard E. (2001). Phosphorus transformations in an Oxisol under contrasting land use systems: The role of the soil microbial biomass. *Plant and Soil* 237:197–210.

OECD. (2003). “Análisis sobre la ecoeficiencia. Logros en los países de la OECD”, www.oecd.org

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2010). *Objetivo 7: Sostenibilidad del medio ambiente*. Recuperado el 3 de abril de 2010, de <http://www.un.org/spanish/millenniumgoals/environ.shtml>.

Orlando, J., & Gerhard, O. (2007). Balance hídrico e influencia del estrés hídrico en la inducción y desarrollo floral de la mandarina “ Arrayana ” en el piedemonte llanero de Colombia Water balance and influence of water stress on floral induction and flower development of “ Arrayana ” mandarin in the Piedemont Plains of Colombia.

Agronomía Colombiana. 25(2), 255–263. Consultado en:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/18335/#sthash.4qzPIV7X.dpuf>

Orozco, J., David, D., Menjivar Flores, J. C., & Rubiano Sanabria, Y. (2015). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica*, 64(4), 302-307.

Oyarzún, C., Nahuelhual, L., Núñez, D. (2004). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Revista ambiente y desarrollo*. Vol. XX / N° 3. 96 – 97.

Pankhurst, C. E., Doube, B. M. and Gupta, V.V.S.R. (eds.). (1997). Biological indicators of soil health. Cab International, Oxon, Uk. pp 9.

Pankhurst, C. E., Ophel – Keller, K., Doube, B.M. and Gupta, V.V.S.R. (1996). Biodiversity of soil microbial communities in agricultural systems. *Biodiversity and conservation* 5, pp 197 – 209.

Pankhurst, C.E., Hawke, B.G., McDonald, H.J., Kirkby, C.A., Buckerfield, J.C., Michelson, P., O’Brien, K.A., Gupta, V.V.S.R and Doube, B.M. (1995). Evaluation of soil biological properties as potential bioindicators of soil health *Australian Journal of Agricultural research* 35, pp 1015 – 1028.

Paoletti, M.G. (1997). Are there alternatives to wheat and cows in ordentiimprobé landscape quality and biodiversity? In: Altieri, M.A. *Agriculture, ecosystems and environment* 74. Paoletti, M.G. (ed.). 1999. Elsevier science B.V. pp 19 – 31.

Paoletti, M.G. (ed.). (1999). *Agriculture, ecosystems and environment*. Elsevier science B.V. Park, J. and Cousins, S.H. 1995. Soil biological health and agro – ecological change. *Agriculture, ecosystems and environment* 56, pp 137 – 148.

Paoletti, M.G., Bressan, M. (1996). Soil invertebrates as bioindicators of human disturbance. *Crit. Rev. Plant Sci.* 15 (1), pp 21 – 62.

Paoletti, M.G., Pimentel, D. (eds.). (1992). *Biodiversity in Agroecosystem*, Elsevier, pp 356.

- Parmelee, R.W., Boleen, P.J., Blair, J. (1998).** Earthworms and nutrient cycling processes: Integrating across the ecological hierarchy. In: Lavelle, P., Barros, E., Blanchart, E., Brown, G., Desjardins, T., Mariani, L., Rossi, J.P. 2001. SOM management in the tropics: Why feeding the soil macrofauna?. Nutrient cycling in agroecosystems. 61.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., & Verón, S. R. (2005).** Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*, 15(87), 14-23.
- Phiri S; Amézquita E; Rao IM; Singh BR. (2001a).** Disc harrowing intensity and its impact on soil properties and plant growth of agropastoral systems in the Llanos of Colombia. *Soil & Tillage Research* 62:131–143.
- Phiri S; Rao IM; Barrios E; Singh BR. (2003b).** Plant growth, mycorrhizal association, nutrient uptake and phosphorus dynamics in a volcanic-ash soil in Colombia as affected by the establishment of *Tithonia diversifolia*. *Journal of Sustainable Agriculture* 21(3):41–59.
- Picone LI; Zamuner EC; Berardo A; Marino MA. (2003).** Phosphorus transformations as affected by sampling date, fertilizer rate and phosphorus uptake in a soil under pasture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67(3):225–232.
- Pimentel, D.(ed.). (1997).** Techniques for reducing pesticide use: Economic and environmental benefits, Wiley, New York. In: Altieri, M.A. *Agriculture, ecosystems and environment* 74. Paoletti, M.G. (ed.). 1999. Elsevier science B.V. pp19 – 31.
- Ponge, J.F. (1999).** Horizons and humus forms in beech forests of the Belgian Ardennes. *Soil Science Society of America Journal*. 63, 6, pp 1888 – 1901.
- Quintero, J. H. G., Anaya, O. C., Riobo, J. H. B., & Baquero, J. E. (2016).** Evaluación de la estabilidad estructural y espacio poroso en un Oxisol de sabana de los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(1).
- Rao, I. M.; Borrero, V.; Ricaurte, J.; García, R.; Ayarza, M.A. (1996).** Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils. II. Differences in shoot and root

growth responses to varying phosphorus supply and soil type. *Journal of Plant Nutrition* (Estados Unidos) v. 19 no.2, p.323-352

Ribal, J., Sanjuan, N., Clemente, G., Loreto Fenollosa, M. (2009). Medición de la ecoeficiencia en procesos productivos en el sector agrario. Caso de estudio sobre producción de cítricos. *Economía Agraria y Recursos Naturales*. ISSN: 1578-0732. Vol. 9, 1. pp. 125-148

Richarson, D.H.S. (ed.). (1987). Biological indicators of pollution, Royal Irish Academy, Dublín, pp 242. In: Altieri, M.A. *Agriculture, ecosystems and environment* 74. Paoletti, M.G. (ed.). 1999. Elsevier science B.V. pp19 – 31.

Riechmann, J. (1995). “Desarrollo sostenible: la lucha por la interpretación”, en VV.AA., *De la economía a la ecología*, Editorial Trotta y Fundación 1º de Mayo, Madrid.

Rigby, D., Woodhouse, P., Young, T., & Burton, M. (2001). Constructing a Farm Level Indicator of Sustainable Agricultural Practice *Ecological Economics*, 39: 463-478.

Rincón, Eric, & Wellens, Ann. (2011). Cálculo de indicadores de ecoeficiencia para dos empresas ladrilleras mexicanas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(4), 333-345. Recuperado en 11 de marzo de 2017, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000400006&lng=es&tlng=es.

Rippstein, G., Amézquita, E., Escobar, G., & Grollier, C. (2001). Condiciones naturales de la Sabana. In : *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. Rippstein Georges (ed.), Escobar German (ed.), Motta Francisco (ed.). Cali: CIAT, 1-21. ISBN 958-694-033-0

Rodríguez G., Bautista R., Dias Avila A., Stachetti Rodrigues G. Espinosa C., González C., Pérez S. (2013). Diagnostico socioeconómico y tecnológico de la altillanura colombiana: línea de base año 2011/12. Convenio Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – CORPOICA – CIAT. Villavicencio y Cali.

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. y Jiménez, J. (2008). Soil Macrofauna. Field Manual. FAO, 101pp

Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L. y Rogers, H.H. (1997). Quantification of Soil Quality. En *Soil Process and the Carbon Cycle* (eds. Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F. y Stewart, B.A.), pp. 387-403, CRC Press, Boca Raton, Florida.

Sili, M. (2005). La Argentina rural: de la crisis de la modernización agraria a la construcción de nuevo paradigma de desarrollo de los territorios rurales. Ediciones INTA, Buenos Aires.

Sinkin C., Wright J. y Burnett R. (2008). Ecoefficiency and firm value, *J. Account. Public Policy* 27, 167–176.

Snowdon, P., Raison, J., Keith, Heather., Ritson, P., Grierson, P., Adams, M., Montagu, K., Bl, H., Burrows, W., Eamus, D. (2002). Protocol for Sampling Tree and Stand Biomass. Technical report no. 31. The Australian Greenhouse Office, Australia, 66p

Spain, V., Okello – Oloya, T. (1985). Variation in the growth of two pasture plants on soil associated with the termitaria of *amitermeslaurensis* (Isóptera: Termitinae). 4th Australian conference on grassland invertebrates ecology, Lincoln College, Canterbury, 13 – 17 May, Caxton Press. In: Lavelle, p., Barros, E., Blanchart, E., Brown, G., Desjardins, T., Mariani, L., Rossi, J.P. 2001. SOM management in the tropics: Why feeding the soil macrofauna?. *Nutrient cycling in agroecosystems*. 61, pp 53 – 61.

Sturm A. y Müller K. (2001). *Standardized EcoEfficiency Indicators*. Ellipson Consultants, Basilea, Suiza, 72 p.

Sturm A., Müller K. y Upasena S. (2004). A manual for the Preparers and Users of Ecoefficiency Indicators. UNC–TAD/ITE/IPC/2003/7, United Nations Conference on Trade and Development. Nueva York y Ginebra, 114 p.

- Swift, M. J., Izac, A. M. N. & Van Noordwijk, M. (2004).** Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes – are we asking the right questions? *Agriculture ecosystems & environment*, 104, 113 – 134.
- Thornton, R.D., & Cimadevilla, G. (2008).** Grises de la extensión, la comunicación y el desarrollo. 1 Ed. Santa Rosa: Base 1; Buenos Aires: Inst. Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA. 316.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. & Polasky, S. (2002).** Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671 – 677.
- Tiunov y Scheu, (1999).** Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow walls of *Lumbricusterrestris L.*(Lumbricidae). *Soil biology and Biochemistry* 31: 2039 – 2048.
- Tiwari, S. C., Mishra, R.R. (1993).** Fungal abundance and diversity in earthworm casts and in uningested soil. *BiolFertil Soil* 16: 131 – 134.
- Topoliantz, S., Ponge, J.F., Viaux, P. (2000).** Earthworm and enchytraeid activity under different arable farming systems, as exemplified by biogenic structures. *Plant and Soil* 225, 39–51.
- Torres Alvarez, J. R. (2016).** Evaluacion y planificacion agroecologica de los suelos de la finca el eden.
- UNEP. (2010).** Assessing global land use and soil management for sustainable resource policies. Bringezu, S; O'brien; Pengue, W.; Swilling, M.; Kauppi, L. 2010. Scoping Paper of the WG Land & soil of the international panel for sustainable resource Management.
- Valderrama, L., & MARTIN, P. (2004).** Ecoeficiencia: producir más con menos. *VITALIS, Caracas*.
- Van Berkel, R. (2004).** Promotion and Implementation of Cleaner Production and EcoEfficiency through Voluntary Partnerships: the case of the Western

Australian Cleaner Production Statement. 5th Asia Pacific Roundtable on Cleaner Production, Kuala Lumpur, Malaysia, 15–18, marzo 2004.

Van Calker, K. J., P.B.M. Berentsen, G.W.J. Giesen y R.B.M. Huirne. (2005). Identifying and Ranking Attributes that Determine Sustainability in Dutch Dairy Farming Agriculture and Human Values, 22: 53-63.

Van Straalen. (1997). Community structure of soil arthropods as a bioindicator of soil health. pp 235 – 264. In: Pankhurst, C., Doube, B.M and Gupta, V.V.S.R. (eds.). 1997. Biological Indicators of soil Health. Cab International, Oxon, Uk.

Van Straalen., Krivolutsky, D.M. (eds.). (1999). Bioindicator systems for soil pollution. NATO ASI series. 16. In: Pankhurst, C., Doube, B.M and Gupta, V.V.S.R. (eds.). 1997. Biological Indicators of soil Health. Cab International, Oxon, Uk. pp 235 – 264.

Vandermeer, J., Perfecto, I. (1995). Breakfast of biodiversity: the truth about rainforest destruction. Food. First Book. Oakland, 185. In: Altieri, M.A. Agriculture, ecosystems and environment 74. Paoletti, M.G. (ed.). 1999. Elsevier science B.V. pp19 – 31.

Varela, H., Thornton, R. (2006). Reflexiones sobre el desarrollo sustentable. El caso: la sojización de la agricultura en argentina desde la gestión simplificada a la multidimensional. Ediciones INTA, EEA Anguil "Ing Agr G. Covas", La Pampa.

Velásquez, E. (2004). Bioindicadores de calidad de suelo basado en las poblaciones de macrofauna y su relación con características funcionales del suelo. Tesis doctoral Universidad Nacional de Colombia. p. 165

Velásquez, E.; Lavelle P.; Andrade, M. (2007). GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. Soil Biology & Biochemistry 39 (2007) 3066–3080

Verfaillie H. A. y Bidwell R. (2000). Measuring ecoefficiency: a guide to reporting company performance. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland, 36 p.

- WBCSD (2006).** Ecoefficiency learning module. World Business Council for Sustainable Development. Geneva, Switzerland, 225 p.
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development). (2000).** "Measuring Eco-Efficiency. A guide to reporting company performance".
- Werner, M.R. (1989).** Earthworm community dynamics in conventional and low-input agroecosystems. *Revue d'Ecologie et Biologie du Sol* 26, 427-437.
- Wiggering, H., C. Dalchow, M. Glemnitz, H. Helming, K. Müller, A. Schultz, U. Stachow y P. Zander. (2006).** *Indicators for Multifunctional Land Use – Linking Socioeconomic Requirements with Landscape Potentials Ecological Indicators*, 6: 238-249. En: *Actas del III Congreso*. Arandía, A., J.M. Intxaurrendieta, J.M. Mangado, M. Pinto, O. Del Hierro, P. Santamaría, C. Icarán, L. Nafarrate. 2008. Incorporación de indicadores sociales y ambientales a los programas de gestión técnico-económica de explotaciones agrarias de Navarra y la CAV. Page 10. 10 3.1.3 http://www.uibcongres.org/imgdb/archivo_dpo4545.pdf
- Winograd, M. (1995).** Indicadores ambientales para Latinoamérica y el Caribe, hacia la sustentabilidad en el uso de la tierra. *Publicación imprenta* San José. Costa Rica. IICA. GTZ. OEA. LURI. 1995. 85. orton.catie.ac.cr
- Zaccagnini, M. (2003).** Proyecto Monitoreo Ecotoxicológico de Agroquímicos sobre la Biodiversidad en Agroecosistemas. INTA/USFWS. INTA Buenos Aires.
- Zangerlé, A., Pando, A., & Lavelle, P. (2011).** Do earthworms and roots cooperate to build soil macroaggregates? A microcosm experiment. *Geoderma*, 167, 303-309.
- Zhiping, C., Yuhui, Q., Baoqing, W., Qin, X. (2006).** Influence of agricultural intensification on the earthworm community in arable farmland in the North China Plain. *European Journal of Soil Biology* 42, S362-S366.