



Universidad
Politécnica
de Cartagena



PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍA Y MODELIZACIÓN EN INGENIERÍA
CIVIL, MINERA Y AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

BALANCE DE CARBONO DE DOS AGROECOSISTEMAS EN UN SUELO DEL
DISTRITO DE RIEGO DEL RIO ZULIA, DEPARTAMENTO NORTE DE
SANTANDER-COLOMBIA

Presentada por Ibonne Geaneth Valenzuela Balcázar
para optar al grado de Doctora
por la Universidad Politécnica de Cartagena

Dirigida por:
Dr. Ángel Faz Cano

Codirigida por:
Dr. José Alberto Acosta Avilés

Cartagena, 2022

CONTRIBUCIONES RESULTANTES DE ESTA INVESTIGACIÓN

Soil Organic Carbon Dynamics in Two Rice Cultivation Systems Compared to an Agroforestry Cultivation System

Ibonne Geaneth Valenzuela- Balcázar, Efraín Francisco Visconti-Moreno, Ángel Faz and José A. Acosta.

Artículo publicado en: Agronomy MDPI

Quartile in category: Q1 (2021)

Impact factor: 3.949 (2021)

Fecha de publicación: diciembre de 2021.

Volumen 12 (1) de 2022

Lugar de edición: Basel, Suiza

Impacto del uso y manejo sobre el carbono orgánico en un suelo agrícola de Norte de Santander Colombia

Ibonne Geaneth Valenzuela Balcázar, Efraín Francisco Visconti Moreno, Ángel Faz Cano, José A. Acosta.

Modalidad: Ponencia ORAL

Evento: 7th International Week of Science, Technology and Innovation.

Fecha: 6 al 9 de octubre de 2020.

Lugar: Universidad Francisco de Paula Santander -San José de Cúcuta, Norte de Santander Colombia.

Efecto del uso y manejo sobre las propiedades físicas de un suelo bajo dos sistemas de cultivos en el Distrito de Riego del Río Zulia, Norte de Santander

Valenzuela B. Ibonne G., Franyer Camarón R y Efraín Visconti M.

Artículo publicado en Revista Suelos ecuatoriales, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Fecha de publicación: junio de 2017

Volumen 45 No. 2 2015

Lugar de edición: Bogotá D.C, Colombia.

Emisión de gas metano (CH₄) en dos tipos de uso del suelo en el distrito de riego del Río Zulia

Ibonne Geaneth Valenzuela Balcázar, Daily Miley Pabón Parada.

Modalidad: Ponencia ORAL

Evento: III Semana Internacional XI Semana Ciencia, Tecnología e Innovación

Fecha: 26 al 28 de octubre de 2016.

Lugar: Universidad Francisco de Paula Santander- San José de Cúcuta, Colombia.



Efecto del uso y manejo sobre la distribución del carbono orgánico en el perfil de un suelo en dos sistemas agrícolas- Colombia

Valenzuela B. Ibonne G, Velasco Miguel, Visconti M. Efraín, Gélvez Rafael, Camarón Franyer y Barbosa Alejandro.

Modalidad: Ponencia ORAL

Evento: XXI Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo.

Fecha: 24-27 de noviembre de 2015.

Lugar: Universidad Nacional experimental del Táchira- Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. San Cristóbal Venezuela.

Efecto del uso y manejo sobre la respiración edáfica y biomasa microbial de un suelo del Distrito de Riego del Río Zulia

Ibonne Geaneth Valenzuela Balcázar, Rafael Gélvez Acevedo, Efraín Francisco Visconti Moreno, Miguel Ángel Muñoz.

Modalidad: Ponencia ORAL

Evento: II Semana Internacional X Semana de Ciencia Tecnología e Innovación

Fecha: 20-23 de octubre de 2015.

Lugar: Universidad Francisco de Paula Santander- Cúcuta, Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	9
SUMMARY.....	10
RESUMEN.....	12
1. INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS E HIPOTESIS	18
2.1 Objetivo General.....	18
2.2 Objetivos Específicos	18
2.3 Hipótesis	18
3. ESTADO DEL ARTE.....	19
3.1 Pérdidas de materia orgánica en el suelo.	22
3.2 Evaluación de la dinámica del carbono orgánico en el suelo.	25
4. METODOLOGÍA	28
4.1 Caracterización biofísica del área de estudio.....	28
4.1.1 Descripción del sitio de estudio.....	28
4.1.2 Descripción del perfil de suelo	31
4.2 Diseño del muestreo	35
4.2.1 Medición de las variables físicas, químicas y específicas del carbono en el suelo.....	35
4.2.2 Medición del carbono orgánico de la necromasa	37
4.2.3 Medición del carbono orgánico de las raíces	38
4.2.4 Medición de pérdidas de carbono orgánico por emisiones de gases a la atmósfera.	38
4.3 Cálculo del balance de carbono orgánico en el suelo superficial	40
4.4 Calidad del carbono por ¹³ C RMN-CP y/o IR (infrarrojo).	41
4.4.1 Calidad del carbono por ¹³ C RMN-CP	41
4.4.2 Espectro de Infrarrojo.....	43
4.5 Determinación de carbono soluble (carbono orgánico en agua de riego).....	44



4.6	Análisis de los datos	45
5.	RESULTADOS.....	46
5.1	Propiedades físicas y químicas del suelo superficial estudiado.....	46
5.2	Evaluación de carbono soluble	55
5.3	Evaluación del carbono orgánico estable del suelo	57
5.4	Evaluación del carbono de la biomasa microbiana.....	63
5.5	Evaluación del carbono en la necromasa sobre el suelo	66
5.6	Evaluación de las emisiones de carbono a la atmósfera	69
5.6.1	Flujo de los gases de efecto invernadero (CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O) según la etapa de cultivo y el uso del suelo	76
5.6.2	Flujo de los GEI según la etapa de cultivo.	76
5.6.3	Flujo de los GEI según el tipo de uso del suelo.	78
5.7	Evaluación de la calidad de C por RMN ¹³ C CP MAS y/o espectro de IR.	80
5.7.1	Calidad de carbono por RMN ¹³ C CP MAS.....	80
5.7.2	Calidad de carbono por espectroscopía de IR.	84
5.8	Balance de entradas y salidas de carbono orgánico en el suelo.....	93
6.	DISCUSIÓN.....	96
6.1	Evidencia de la degradación física y química del suelo	96
6.2	Carbono orgánico estable del suelo	97
6.3	Carbono de la biomasa microbiana.....	97
6.4	Carbono de la necromasa.....	99
6.5	Perdidas de carbono por emisiones a la atmosfera	99
6.6	Calidad de carbono por ¹³ C CP RMN MAS y/o espectro IR.....	100
6.7	Balance del COS en los sistemas de uso del suelo estudiados	103
6.8	Influencia de las prácticas de uso y manejo en cada agroecosistema sobre las emisiones de gases.	103
7.	CONCLUSIONES	106
8.	REFERENCIAS	108
9.	ANEXOS.....	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Registro de Temperaturas máxima y mínima, y precipitación mensual en el sitio de estudio durante los meses del estudio.....	31
Tabla 2. Perfil de suelo en uso cultivo de arroz.....	33
Tabla 3. Perfil de suelo con uso en bosque con cacao (agroforestal).....	33
Tabla 4. Composición mineralógica del suelo estudiado.	34
Tabla 5. Metodologías para medir propiedades físicas y químicas del suelo.....	36
Tabla 6. Metodologías analíticas específicas para medir el C.....	37
Tabla 7. Clase textural de cada horizonte en el perfil de suelo de cada parcela experimental	49
Tabla 8. Caracterización de la estructura de cada horizonte del perfil en las parcelas de arroz irrigado, arroz seco y agroforestal	50
Tabla 9. Propiedades físicas y químicas del suelo a profundidad de 0 a 10 cm en cada parcela.....	51
Tabla 10. Propiedades físicas y químicas del suelo a profundidad de 10 a 30 cm en cada parcela.....	52
Tabla 11. Propiedades físicas y químicas del suelo a profundidad de 30 a 60 cm en cada parcela.....	53
Tabla 12. Porcentaje de COT en el agua de riego a la entrada y salida del cultivo de arroz	56
Tabla 13. Tabla de medias para COS con intervalos de confianza del 95%	58
Tabla 14. Análisis de varianza para COS - suma de cuadrados Tipo III.....	58
Tabla 15. Tabla de medias para el COS en la interacción del uso del suelo con la etapa del cultivo.	61
Tabla 16. Cálculo del almacenamiento de CO en el perfil de suelo.....	62
Tabla 17. Tabla de medias para carbono de la biomasa microbiana con intervalos de confianza del 95%.	63
Tabla 18. Carbono orgánico del suelo (COS), carbono orgánico (CO) de la biomasa microbiana y carbono de la necromasa en el suelo superficial con comparaciones de LSD en intervalos de confianza del 95%.	64
Tabla 19. Tabla de Medias para carbono de la necromasa para los factores evaluados.....	67
Tabla 20. Comparaciones no paramétricas de medianas (Kruskal-Wallis) de emisiones de CO ₂ y CH ₄ por tipo de uso del suelo.	70
Tabla 21. Resumen de estadísticos para el Flujo de los GEI en el experimento de campo..	76
Tabla 22. Balance del carbono orgánico del suelo superficial en los usos de suelo estudiados.	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagen satelital del lugar de estudio tomada en enero de 2016 por Sentinel.	28
Figura 2. Parcela de bosque con cacao (Agroforestal)	29
Figura 3. Parcela con cultivo de arroz irrigado.	30
Figura 4. Parcela con cultivo de arroz de secano	31
Figura 5. Primeros 10 cm de suelo con uso en cultivo de arroz	32
Figura 6. Perfiles de suelo cultivo de arroz irrigado, arroz secano y bosque con cacao respectivamente	34
Figura 7. Distribución de partículas minerales del suelo en función de la profundidad en el suelo de la parcela de arroz irrigado	47
Figura 8. Distribución de partículas minerales del suelo en función de la profundidad en el suelo de la parcela de arroz de secano.	47
Figura 9. Distribución de partículas minerales del suelo en función de la profundidad en el suelo de la parcela del sistema agroforestal del bosque con cacao.	48
Figura 10. Gráfica de la Da del suelo en cada profundidad para cada parcela.....	54
Figura 11. Gráfica del contenido de COS por cada tipo de uso del suelo	59
Figura 12. Gráfica del contenido de COS para cada profundidad de suelo.....	60
Figura 13. Gráfica del contenido de COS para cada etapa del cultivo.	60
Figura 14. Gráfica del contenido de COS en cada parcela y para cada profundidad	62
Figura 15. Efecto de interacción del uso del suelo y la etapa sobre el carbono orgánico (CO) de la biomasa microbiana (MB) (n = 6).	65
Figura 16. Efecto de interacción del ciclo y la etapa sobre el carbono orgánico (CO) de la biomasa microbiana (BM) (n = 15).	66
Figura 17. Efecto del uso del suelo y etapa sobre el carbono de la necromasa (n = 6).	68
Figura 18. Efecto del factor Uso del suelo sobre el Carbono de la necromasa.	68
Figura 19. Efecto del factor etapa de muestreo sobre el carbono de la necromasa.	69
Figura 20. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O) en el primer muestreo (M1).....	71
Figura 21. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O) en el segundo muestreo (M2).....	72
Figura 22. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O) en el tercer muestreo (M3).	73
Figura 23. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O) en el cuarto muestreo (M4).	74
Figura 24. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O) en el quinto muestreo (M5).	75
Figura 25. Flujo del óxido nitroso (N ₂ O) según la etapa de cultivo.	77
Figura 26. Flujo del dióxido de carbono (CO ₂) según la etapa de cultivo.	77



Figura 27. Flujo del metano (CH ₄) según el tipo de uso del suelo.....	78
Figura 28. Flujo de dióxido de carbono (CO ₂) en función del tipo de uso del suelo.	79
Figura 29. Flujo de óxido nitroso (N ₂ O) en función del tipo de uso del suelo.....	80
Figura 30. RMN ¹³ C MAS Arroz irrigado 0-10 cm inicio de ciclo.....	81
Figura 31. RMN ¹³ C CP MAS Arroz de secano 0-10 cm inicio de ciclo.....	82
Figura 32. RMN ¹³ C MAS Arroz irrigado 0-10 cm final de ciclo	82
Figura 33. RMN ¹³ C CP MAS Arroz de secano 0-10 cm final de ciclo.....	83
Figura 34. RMN ¹³ C CP MAS Bosque con cacao 0-10 cm inicio de ciclo.....	83
Figura 35. RMN ¹³ C MAS Bosque con cacao 0-10 cm final de ciclo	84
Figura 36. DRIFT Au en Arroz irrigado 0-10 cm	85
Figura 37. DRIFT KBr en Arroz irrigado 0-10 cm	86
Figura 38. ATR en Arroz irrigado 0-10 cm.....	86
Figura 39. DRIFT Au en Arroz irrigado 10-30 cm	86
Figura 40. DRIFT KBr en Arroz irrigado 10-30 cm	87
Figura 41. DRIFT Au en Arroz irrigado 30-60 cm	87
Figura 42. DRIFT KBr en Arroz irrigado 30-60 cm	87
Figura 43. DRIFT Au en Arroz de secano 0-10 cm	88
Figura 44. DRIFT KBr en Arroz de secano 0-10 cm	88
Figura 45. DRIFT Au en Arroz de secano 10-30 cm	88
Figura 46. DRIFT KBr en Arroz de secano 10-30 cm	89
Figura 47. DRIFT Au en Arroz de secano 30-60 cm	89
Figura 48. DRIFT Au en Arroz de secano 30-60 cm	89
Figura 49. DRIFT Au en Bosque con cacao 0-10 cm	90
Figura 50. DRIFT KBr en Bosque con cacao 0-10 cm	90
Figura 51. DRIFT Au en Bosque con cacao 10-30 cm	90
Figura 52. DRIFT KBr en Bosque con cacao 10-30 cm	91
Figura 53. DRIFT Au en Bosque con cacao 30-60 cm	91
Figura 54. DRIFT KBr en Bosque con cacao 30-60 cm	92
Figura 55. Estadísticos del espectro infrarrojo	93

AGRADECIMIENTOS

Ha finalizado una etapa muy importante de mi vida en la que los estudios doctorales llevados a cabo y dentro de la investigación de tesis me han hecho reflexionar continua y profundamente sobre los temas desarrollados, no solo sobre la profundidad de la ciencia sino también sobre la vida, fueron muchos años de dedicación, algunas veces de mucho stress y de seguir luchando con resiliencia por el cumplimiento de los objetivos planteados, los diferentes factores a nivel mundial que pudieron influir, pero con la satisfacción de lograr cumplir tan importante etapa sumamente valiosa en mi formación académica y profesional.

Quiero agradecer primero que todo a Dios, a mi familia, a mi director de tesis el Dr. Ángel Faz Cano quien siempre estuvo allí apoyándome a lo largo de esta etapa, a mi codirector Dr. José Alberto Acosta, al grupo de investigación Gestión, Aprovechamiento y Recuperación de Suelos y Aguas GARSA y al Dr. Alberto Alcolea Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica SAIT de la Universidad Politécnica de Cartagena, a mi compañero y colega M.Sc. Efraín Visconti, al laboratorio de suelos de calidad ambiental y suelos agrícolas de la Universidad Francisco de Paula Santander, a mis alumnos Daily Pabón, Miguel Velasco, Rafael Gélvez, Franyer Camarón y a María José de la Mata laboratorio RMN Sólidos de la Universidad Autónoma de Madrid. A todas aquellas personas que de una u otra manera me apoyaron en algún momento durante el desarrollo de esta importante etapa. Mil gracias.



SUMMARY

The use and management of soil can affect carbon dynamics, soil properties and cause greenhouse gas emissions. After changes in tillage on croplands it's necessary to assess the effects on soil organic carbon (SOC) dynamics, in order to identify if soil is a sink or emitter of carbon dioxide to the atmosphere. This study was carried in two plots of rice cultivation, where tillage and water management changes occurred. A third plot of native forest with Cacao trees was used as a reference soil (agroforestry). For SOC balance estimation, measurement of organic carbon (OC) inputs was determined from necromass, roots, microbial biomass, and urea applications. The CO₂ and CH₄ emissions were also measured. Results showed that the change in the use of irrigation and tillage in rice cultivation did not cause significant differences in OC inputs to the soil, or in outputs due to carbon emissions.

The content of oxidizable organic carbon in the soil shows that there is a significant effect of several factors: land use, crop stage and soil depth. For the SOC, it was found that the agroforestry system has a significantly higher content than the soil under rice cultivation, both with and without irrigation. When comparing the behavior of the total edaphic respiration in each land use, it was found that the agroforestry system expressed the lowest total respiration, contrary to the use with rice that presents greater total respiration and does not show significant differences between them. The behavior of each greenhouse gas (methane, carbon dioxide and nitrous oxide) was different depending on the type of land use and the stage of cultivation, the emission curves showed that the soil in all types of use and stages culture, behaved as emitter or source of carbon dioxide. However, for methane and nitrous oxide there are situations where the soil is a sink. The Flux of CO₂ and N₂O gases is significantly affected by the stage of the crop factor, while for the Flux of CH₄ there is no significant effect. For N₂O, the lowest emission was in the third stage and the highest emission was in the first stage, while for carbon dioxide the lowest emission was in the second stage and the highest emission was recorded in the fourth stage. For the CH₄ Flux there is a statistically significant effect of the type of land use factor, with irrigated



rice being the use that shows the highest CH₄ Flux and the agroforestry system the use with the lowest CH₄ Flux.

In addition, it was found that both the irrigation and tillage management systems in rice cultivation compared to the agroforestry system were management systems with a negative difference between OC inputs and outputs, due to CO₂ emissions associated with intense stimulation of crop root respiration and microbial activity. The comparison of the SOC dynamics between the agroforestry system and the rice cultivation systems showed that the agroforestry system is a carbon sink with positive OC dynamics.



RESUMEN

El uso y manejo que se le dé a un suelo puede afectar la dinámica del carbono, las propiedades del suelo y causar emisión de gases de efecto invernadero. Después de los cambios de labranza en las tierras de cultivo es necesario evaluar los efectos sobre la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS), con el fin de identificar si el suelo es un sumidero o emisor de carbono a la atmósfera. La presente investigación se llevó a cabo en dos parcelas de cultivo de arroz, donde ocurrieron cambios en la labranza y manejo del agua. Una tercera parcela de bosque nativo con árboles de cacao se utilizó como suelo de referencia (agroforestal). Para estimar el balance de COS, se determinaron las entradas de carbono orgánico (CO) a partir de aplicaciones de necromasa, raíces, biomasa microbiana y urea. También se midieron las emisiones de CO₂ y CH₄. Los resultados mostraron que el cambio en el uso del suelo, riego y labranza en el cultivo de arroz no provocó diferencias significativas en las entradas de CO al suelo, ni en las salidas por emisiones de carbono. El contenido de carbono orgánico oxidable en el suelo muestra que hay efecto significativo de los siguientes factores: uso del suelo, etapa del cultivo y profundidad del suelo. Para el COS se encontró que el sistema agroforestal tiene un contenido significativamente mayor al del suelo bajo cultivo de arroz, tanto con riego como sin riego. Al comparar el comportamiento de la respiración edáfica total en cada uso del suelo, se encontró que el sistema agroforestal mostró la menor respiración total, por el contrario, el uso con arroz presentó la mayor respiración total, no mostrando diferencias significativas entre ellos. El comportamiento de cada gas de efecto invernadero (metano, dióxido de carbono y óxido nitroso) es diferente según el tipo de uso del suelo y la etapa del cultivo, las curvas de emisión mostraron que el suelo en todos los tipos de uso y etapas de cultivo se comportó como emisor o fuente de dióxido de carbono. Sin embargo, para el metano y el óxido nitroso hay situaciones en que el suelo es sumidero. El flujo de los gases CO₂ y N₂O está afectado significativamente por el factor etapa del cultivo, mientras que para el flujo de CH₄ no hay efecto significativo. Para el N₂O la menor emisión fue en la tercera etapa del cultivo y la mayor emisión fue en la primera etapa, mientras que para el dióxido de carbono



la menor emisión fue en la segunda etapa del cultivo y la mayor emisión se registró en la cuarta etapa. El uso del suelo mostró un efecto estadísticamente significativo en el flujo de CH_4 , siendo el arroz con riego, el uso que muestra el mayor flujo de CH_4 mientras que el sistema agroforestal mostró el menor flujo de CH_4 .

Además, se encontró que tanto los sistemas de manejo de riego como de labranza en el cultivo de arroz en comparación con el sistema agroforestal fueron sistemas de manejo con una diferencia negativa entre las entradas y salidas de CO_2 , debido a las emisiones de CO_2 asociadas a la estimulación intensa de la respiración de la raíz del cultivo y la actividad microbiana. La comparación de la dinámica del COS entre el sistema agroforestal y los sistemas de cultivo de arroz mostró que el sistema agroforestal es un sumidero de carbono con una dinámica de CO positiva.



1. INTRODUCCIÓN

El suelo y sus constituyentes, tales como la arcilla, el humus y los microorganismos, se encuentran entre los componentes más importantes para los ecosistemas terrestres, ya que ofrecen múltiples servicios eco-sistémicos (Lal, 2004). La capacidad del suelo para cumplir con sus funciones depende del estado de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, (Manlay *et al.*, 2006; Karlen *et al.*, 2003).

El uso agrícola intensivo de los suelos amenaza la productividad y funcionalidad de los ecosistemas debido principalmente a una disminución en el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), provocada por una disminución de los aportes de residuos orgánicos y el incremento en la emisión de gases (Mondini y Sequi, 2008; Minasny *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2020; Malyan, 2021; Mona *et al.*, 2021).

En la búsqueda de sistemas agrícolas sostenibles, es importante evaluar el comportamiento del COS. La mayoría de las evaluaciones de sostenibilidad asumen que la materia orgánica es algo positivo, y que el aumento de materia orgánica, o detener su declive, favorece el almacenamiento de carbono orgánico (Christensen, 1996). Por lo tanto, un componente importante de la evaluación del impacto de una práctica de manejo es monitorear el cambio en el COS en comparación con las variaciones que se produce cuando esa práctica no se implementa.

Los cambios en el carbono orgánico (CO) en suelos agrícolas están determinados tanto por los aportes acumulados de CO procedente de los cultivos como por los altos retornos impulsados por los fertilizantes nitrogenados, así como cuando la frecuencia de barbecho es baja, lo que puede favorecer un aumento del COS (Smith *et al.*, 2018). Sin embargo, este es un proceso complejo y dinámico. Saljnikov *et al.* (2013) señalaron que del 55 al 70% del carbono de los residuos orgánicos que llegan al suelo se pierde por emisiones gaseosas a la atmósfera, y del 5 al 15% se incorpora a la biomasa microbiana del suelo. El balance entre los aportes y pérdidas de carbono orgánico en el suelo constituye una metodología de evaluación para identificar su funcionamiento como sumidero o como



emisor de carbono en el ecosistema, permitiendo evaluar y comparar la dinámica del carbono orgánico en suelos bajo diferentes sistemas de uso y manejo (Haque *et al.*, 2015).

Lal (2010) señaló que, en el cultivo intensivo, los suelos de las tierras de cultivo contienen entre un 25 y un 75 % menos COS que sus contrapartes en ecosistemas naturales o no perturbados. Sin embargo, los suelos con cultivos de arroz a largo plazo pueden aumentar significativamente las cantidades de COS (Yu *et al.*, 2012); esta acumulación de CO en los suelos de arrozales bajo sistemas de cultivo de arroz intensivo puede ocurrir debido a su alta producción de biomasa de estos cultivos y a las menores tasas de descomposición debido a la inmersión prolongada (Yu *et al.*, 2009; Sun *et al.*, 2013). A pesar de la alta capacidad de almacenamiento de COS, se ha demostrado que el cultivo de arroz en suelos de arrozales puede producir altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Irisarri *et al.*, 2021), debido principalmente a la intensificación de cultivos con labranza, aplicación de fertilizantes y riego, así como el uso de cultivos mejorados (Adeel *et al.*, 2018).

Recientemente, la agrosilvicultura ha surgido como un sistema de cultivo que mejora el almacenamiento de COS, ya que los aumentos en las existencias de C en la superficie están asociados con un mayor volumen de residuos orgánicos de la vegetación que se incorpora al suelo (Marques *et al.*, 2015). La hojarasca producida por los sistemas agroforestales es el primero de todos los factores que promueve la renovación de las reservas de CO en el suelo. Mantiene el suelo cubierto y protegido de los impactos directos de la lluvia y el sol, manteniendo así un mayor nivel de humedad en el suelo, lo que contribuye a que la biota del suelo aporte C y nutrientes debido a la descomposición de la materia orgánica que en última instancia formará el humus que constituye el COS (Frouz *et al.*, 2007).

Por otro lado, el papel de los microorganismos en la dinámica del COS ha evolucionado desde un concepto de depósito hasta teorías emergentes de producción microbiana de materia orgánica, lo que ha dado lugar a la consideración de la biomasa microbiana como fuente de COS, una situación significativamente evidente cuando el



aumento de los aportes de residuos vegetales también proporciona más sustrato para los microorganismos del suelo, lo que resulta en una comunidad microbiana más activa y abundante (Six *et al.*, 2006; Miltner *et al.*, 2012; Lange *et al.*, 2015).

En Colombia, el arroz (*Oryza sativa*) es el tercer producto agrícola en extensión después del café (*Coffea arábica*) y el maíz (*Zea mays*), representando el 13% del área cosechada del país. El departamento Norte de Santander agrupa un área de producción de 40.000 hectáreas, donde el distrito de riego del río Zulia, concentra aproximadamente 38.000 ha (FEDEARROZ, 2018).

Los suelos del distrito de riego del río Zulia, son suelos agrícolas con un historial de producción de arroz con más de 40 años, tiempo a través del cual las prácticas de cultivo han estado dominadas por el uso intensivo de maquinaria agrícola en la modalidad de labranza en suelo inundado (fangueo), el uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos, así como el riego por inundación. Valenzuela *et al.* (2015) concluyeron que la degradación del suelo en el distrito de riego del río Zulia, por el deterioro de sus propiedades físicas, genera una pérdida de productividad que redujo los rendimientos de 7 t ha^{-1} a aproximadamente $5,5 \text{ t ha}^{-1}$. Desde los últimos cinco años, con el fin de contrarrestar los problemas de degradación del suelo, se ha introducido un nuevo sistema de cultivo de arroz que consiste en labranza en suelo parcialmente seco sin riego por inundación para un sistema de secano. Sin embargo, se desconoce el efecto sobre las propiedades y constituyentes del suelo después de su implementación.

En la búsqueda de sistemas agrícolas sostenibles, es importante evaluar el comportamiento del carbono orgánico en el suelo (COS). La mayoría de las evaluaciones de sostenibilidad asumen que la materia orgánica es necesaria para lograr la productividad del suelo y que el aumento de los aportes de materia orgánica favorece el almacenamiento de carbono orgánico en los suelos (Adeel *et al.*, 2018). Por lo tanto, una metodología recomendada para evaluar el impacto de una práctica de manejo es monitorear el cambio en el COS en comparación con el cambio que se produce cuando esa práctica no se implementa (Lal, 2004; Muñoz-Rojas *et al.*, 2012; Álvaro-Fuentes *et al.*, 2018). Por lo



tanto, este estudio evalúa los cambios en la dinámica y en el balance del COS causados en el cultivo de arroz después de modificar la labranza y el riego, utilizando como referencia el suelo de un sistema agroforestal de bosque natural con cacao (*Theobroma cacao*).



2. OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1 Objetivo general

Evaluar el balance de carbono de dos agroecosistemas en un suelo del Distrito de riego del Río Zulia en el Departamento Norte de Santander-Colombia sometido a diferentes tipos de uso: arroz bajo riego, arroz de secano y agroforestal (bosque con cacao).

2.2 Objetivos específicos

- Medir las entradas de C al suelo (necromasa, raíces, biomasa microbiana, urea y carbono en el agua de riego) y determinar las salidas de C en el suelo (emisiones gaseosas de CO₂ y CH₄ en los suelos estudiados y carbono en el agua de drenaje).
- Determinar el contenido de carbono orgánico a diferentes profundidades del suelo y evaluar su calidad por ¹³C RMN y/o IR (infrarrojo).
- Analizar la influencia de las prácticas de uso y manejo para cada agroecosistema en las emisiones de gases (CO₂, CH₄ y N₂O).

2.3 Hipótesis

- H1. Al evaluar el balance del carbono orgánico del suelo en dos sistemas de cultivo del Distrito de Riego Zulia se hallará una diferencia positiva en el contenido de COS en el sistema agroforestal de bosque con cacao comparado con el cultivo de arroz.
- H0. Al evaluar la dinámica del carbono orgánico del suelo en dos sistemas de cultivo del Distrito de Riego Zulia no se hallará una diferencia positiva en el contenido de COS en el sistema agroforestal de bosque con cacao comparado con el cultivo de arroz.



3. ESTADO DEL ARTE

La materia orgánica del suelo (MOS) es la mayor reserva de C de la biosfera continental con 1550 Pg; alrededor de tres veces la de la vegetación: 560–650 Pg, y más que la reserva atmosférica: 750 Pg, la cual se ha acumulado en el suelo durante cientos o incluso miles de años (Lal, 2004). Los estudios sobre el almacenamiento de carbono en los suelos han estimado que el potencial de almacenamiento de C en las tierras de cultivo del mundo es de aproximadamente 0,6 a 1,2 Pg C por año (Lal, 2004).

El depósito de COS a un metro de profundidad varía de 30 ton ha⁻¹ en climas áridos a 800 ton ha⁻¹ en suelos orgánicos en regiones frías, presentándose un rango predominante de 50 a 150 ton ha⁻¹. El almacenamiento total de COS representa un equilibrio dinámico de ganancias y pérdidas. La conversión de ecosistemas naturales a agrícolas provoca el agotamiento de la reserva de COS hasta en un 60 % en los suelos de las regiones templadas y en un 75 % o más en los suelos cultivados en los trópicos. El agotamiento se incrementa cuando la salida de C excede la entrada y cuando la degradación del suelo es severa. En algunos suelos se han encontrado pérdidas de 20 a 80 toneladas de C ha⁻¹, en su mayoría debido a emisiones a la atmósfera (Lal, 2004).

El almacenamiento de COS no es estático, sino que forma parte del ciclo de carbono donde el C circula entre las diferentes reservas mundiales de carbono en formas moleculares diversas (Kane, 2015). Esto es debido principalmente a la emisión de CO₂ (dióxido de carbono) y CH₄ (metano), los principales gases atmosféricos basados en carbono generados en el suelo. Sin embargo, los organismos autótrofos (principalmente plantas), y microorganismos foto- y quimio-autótrofos sintetizan el CO₂ atmosférico en material orgánico. Los residuos orgánicos de la biota que cubre el suelo (principalmente en forma de residuos vegetales y exudados) son incorporados al suelo por la fauna del mismo, lo que conlleva la entrada de carbono en el suelo a través de la transformación del material orgánico por microorganismos heterótrofos. Este proceso de transformación de materiales orgánicos da como resultado una mezcla biogeoquímica compleja de residuos vegetales y productos de descomposición microbiana en varias etapas de descomposición (Von Lützwow

et al., 2006; Paul, 2014) que pueden asociarse con minerales del suelo y ocluirse dentro de agregados, permitiendo la persistencia del COS durante décadas, siglos o incluso milenios (Schmidt *et al.*, 2011). El CO₂ y CH₄ se emiten de vuelta a la atmósfera cuando la materia orgánica del suelo (MOS) es descompuesta (o mineralizada) por microorganismos.

Por otra parte, el secuestro de C tiene un potencial finito y un aumento anual de la MOS puede sostenerse durante solo 50 a 100 años; a medida que el suelo tiende a acercarse a un nuevo equilibrio, el aumento del C orgánico del suelo (COS) se ralentiza y eventualmente cesa (Smith *et al.*, 2007). Además, este potencial teórico se ve disminuido aún más por varias limitaciones, tales como: la idoneidad de la tierra, la falta de disponibilidad de la tierra y los recursos y las restricciones socioeconómicas. Debido a esta limitación, se calculó que solo el 20% del potencial de secuestro de C del suelo se puede lograr de manera realista (Freibauer *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2007).

El tamaño de la reserva de C en el suelo y la creciente preocupación ambiental por el cambio climático han atraído recientemente la atención de científicos y políticos sobre el potencial del secuestro de C en el suelo como estrategia para abordar las emisiones de GEI. Como consecuencia, se han ido desarrollando muchos proyectos de investigación a diferentes niveles sobre varios aspectos relacionados con el secuestro de C. Por ello, desde hace décadas los edafólogos reconocen que la MOS es un factor importante que controla la capacidad del suelo para brindar servicios agrícolas y ambientales y sustentar a la humanidad tanto a nivel local (p. ej., mantenimiento de la fertilidad) como global (p. ej., mitigación de las emisiones de carbono atmosférico), (Tiessen *et al.*, 1994; Syers y Craswell, 1995).

No obstante, existe un gran desafío, ya que el uso y manejo inadecuado de los suelos ha llevado al deterioro de los mismos, generando alteraciones en sus componentes bióticos y abióticos, más específicamente disminución en la capacidad de retención del agua, en los contenidos de carbono orgánico e interacciones de los gases generados por el suelo con la atmósfera.



Se sabe que la MOS incrementa la habilidad del suelo para resistir todas las formas de degradación y, especialmente, la erosión, debido a diversos efectos como el mantenimiento de una condición estructural que permite la circulación de agua y gases al tiempo que retiene una cantidad considerable de la misma (Lal, 1997). El funcionamiento de los suelos y su habilidad para suministrar nutrientes, almacenar agua, liberar gases de efecto invernadero, modificar contaminantes, resistir la degradación física y producir cosechas dentro de un sistema de manejo sostenible están profundamente influenciados por el contenido de materia orgánica (Rees *et al.*, 2001).

La descomposición de residuos vegetales, animales, domésticos e industriales en el suelo es un proceso biológico que involucra la asimilación parcial del carbono (C) por la biomasa del suelo, de igual manera la recirculación de la mayor parte del C hacia la atmósfera como dióxido de carbono (CO₂) y la transformación y polimerización del carbono restante a materiales de elevado peso molecular conocidos como humus.

Debido a la acción de la biota del suelo se sintetizan nuevos materiales húmicos, una fracción del humus nativo es mineralizado por los microorganismos del suelo, produciendo efectos estructurales en el mismo y liberando algunos nutrientes. El nitrógeno (N) se transforma en amonio (NH⁴⁺) y nitrato (NO₃⁻), formas disponibles para las plantas y otros organismos, y los elementos asociados (Ca, Mg, K, P, S y varios micronutrientes) pasan a formas solubles o intercambiables para ser usados por las plantas superiores y otros organismos del suelo. Por ello, los procesos microbianos del suelo tienen marcada influencia en la fertilidad del suelo.

La población microbiana del suelo es muy amplia y diversa. Una de las principales expresiones de la diversidad es la multiplicidad de procesos en los cuales participan los microorganismos en el suelo como cuerpo natural y en el sistema suelo-planta-atmósfera. A continuación, se presenta una discusión muy sucinta de las principales funciones y los procesos en los cuales participan los microorganismos del suelo que tienen relación con la fertilidad y la nutrición de las plantas.



Hay diversos mecanismos por los cuales los microorganismos favorecen la nutrición de las plantas, entre los cuales se pueden destacar los siguientes: 1) Un suministro directo de nutrientes, como en el caso de algunas modalidades de fijación biológica de N_2 ; 2) Un aumento en la capacidad del sistema radical de la planta para absorber nutrientes, como en el caso de la micorrización y los efectos de promoción del crecimiento radical; 3) La mineralización de nutrientes, es decir la transformación de compuestos orgánicos que las plantas no pueden absorber, a formas inorgánicas de nutrientes que sí pueden ser absorbidas; 4) La solubilización de formas inorgánicas de nutrientes, como en el caso del fósforo; 5) Otros cambios químicos de formas inorgánicas de nutrientes, debidos a procesos de óxido-reducción; 6) Algunos efectos indirectos, como aquellos debidos al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.

Existen algunos procesos microbianos en el suelo que implican pérdidas de formas disponibles de nutrientes; estas pérdidas pueden ser de corta, media o larga duración. Ejemplos de estos procesos son la desnitrificación, por la cual se pierden formas de N del suelo, y la inmovilización de nutrientes, por la cual formas utilizables por las plantas se incorporan a las estructuras microbianas y no pueden ser tomadas por las mismas, al menos por cierto tiempo. Algunos otros procesos de transformación mediados por los microorganismos en el suelo, como la nitrificación, pueden tener un efecto neto beneficioso o perjudicial para la fertilidad del suelo, dependiendo de las condiciones de este, del clima, de la planta y de la tasa a la cual ocurran (Martínez, 2010).

3.1 Pérdidas de materia orgánica en el suelo

El ciclo del carbono es uno de los ciclos biogeoquímicos más importantes, ya que este es un elemento estructural de todos los organismos. Se ha de tener en cuenta que la cantidad de carbono depositada en el suelo en forma de materia orgánica y en los fósiles y rocas sedimentarias carbonatadas supera en tres o cuatro veces la de la atmósfera (Smith, 2004), lo que pone de manifiesto el importante papel del suelo en el secuestro de carbono.



Se han reportado incrementos en el contenido de carbono del suelo en los primeros 100 cm, de 6,9 veces entre los 600 y 3700 m de altitud (Smith, 2004). Dicho aumento con la altitud se debe al almacenamiento debido a que la disminución de la temperatura reduce la actividad de la biota del suelo que participa en su mineralización. Esta es la misma razón por la que se cree que la mayor parte de los andosoles y suelos ácidos de los altiplanos colombianos tienen altos contenidos de materia orgánica (Smith, 2004).

La descomposición de todos los residuos animales y vegetales es un proceso en el que la materia orgánica es transformada a sus elementos constitutivos (mineralización) y, con la síntesis simultánea de compuestos húmicos (humificación), liberándose energía (Lavelle y Spain, 2001).

En particular la descomposición de estructuras vegetales como hojas muertas y raíces, residuos de cosecha, abonos de origen animal o vegetal es una de las vías principales en las que el carbono fijado por fotosíntesis vuelve a la atmósfera (Reeves *et al.*, 1997). En dicho proceso intervienen la fauna y los microorganismos del suelo. Dentro de los ecosistemas, el subsistema de descomposición cumple dos funciones importantes: la mineralización de los nutrientes primarios y la formación de la materia orgánica del suelo.

La tasa de movimiento a través de la descomposición de estos nutrientes primarios es un regulador clave de la producción primaria. A su vez la renovación de la materia orgánica y su distribución en el suelo son los principales determinantes de la estructura de los ecosistemas, de igual modo, el ciclo biogeoquímico de los nutrientes representa el principal aspecto de su dinámica interna y constituyen la base de la fertilidad del suelo. Esto se debe a que la materia orgánica almacena elementos en forma poco asimilables para los microorganismos, que a largo plazo contribuirán a la disponibilidad de elementos para la nutrición de los organismos del suelo y de la vegetación. También mantiene la cohesión de las partículas de suelo, contribuyendo a la formación de agregados que favorecen la aireación y el flujo de agua, y por su carga negativa, retiene cationes (Lavelle y Spain, 2001).



La descomposición involucra una pérdida de elementos por simple lavado (lluvia, irrigación, agua de escorrentía), la fragmentación del material vegetal (en el que participa principalmente la fauna del suelo, dejando una mayor área expuesta para el ataque de los microorganismos) y la transformación del material por parte de los microorganismos (mediante su actividad enzimática).

En esta transformación también se dan procesos de oxidación de tipo abiótico, pero se estima que estos sólo conforman el 20% de la mineralización. Swift *et al.* (2021) propusieron que había tres factores principales que determinaban el porcentaje de descomposición de la materia orgánica: las condiciones ambientales (clima y características del suelo), la calidad del recurso que se descompone, desde el punto de vista físico, pero principalmente químico, y los organismos, fauna y microbiota, los cuales interactuaban entre sí, conformando un triángulo esquemático.

Posteriormente modificaron dicho modelo por uno jerárquico al comprobar que el clima tenía un efecto dominante sobre los demás factores. Con base en las propuestas de Manzoni y Porporato (2009) se identificaron posteriormente cuatro factores jerárquicos, que en orden de importancia son: los factores climáticos, principalmente humedad y temperatura; las propiedades del suelo, especialmente arcillas y pH; las características físicas y químicas del material a descomponerse; los factores biológicos y organismos. Lavelle y Spain (2001) proponen que este modelo funciona en ecosistemas templados, pero que en ecosistemas tropicales los organismos y especialmente la macrofauna, tienen un papel más importante que las propiedades del suelo y que las características del sustrato.

Sin embargo, Lavelle y Spain (2001) no tienen en cuenta la variedad de condiciones climatológicas que existen en los ecosistemas tropicales, por lo que, al parecer en estos ecosistemas, a bajas altitudes predomina la actividad de la fauna, mientras que, por encima de los 2700 m de altitud, bosque de niebla, páramo, prevalece la actividad microbiana sobre la de fauna edáfica, por la baja temperatura, como lo sugieren los resultados de Wall *et al.* (2015).



De hecho, algunos estudios recientes indican que, a nivel global, las regiones con climas más cálidos y húmedos favorecen las comunidades de fauna del suelo, al aumentar la diversidad taxonómica, y probablemente también funcional, incrementando de esta manera la tasa de descomposición y liberación de carbono. Sin embargo, se sugiere que en el trópico la fauna tiene un papel importante en el control de la descomposición del material vegetal, pero que no es posible predecir su efecto a partir del patrón de precipitación. Aunque en el ámbito mundial, el clima regula la tasa de descomposición de la hojarasca, dentro de una región climática particular el mejor indicador de la tasa de descomposiciones es la calidad química del sustrato que se descompone (Wall *et al.*, 2015).

3.2 Evaluación de la dinámica del carbono orgánico en el suelo

El estudio de la dinámica del COS permite analizar la capacidad de reserva que tienen los suelos a almacenar carbono, pudiéndose evaluar calculando el equilibrio entre entradas y salidas de C en el suelo (Lal, 2001). El agotamiento de la reserva de COS ocurre cuando las entradas de residuos sólidos de C son menores que las salidas de C, es decir, que pueden ocurrir cambios en el contenido de COS cuando ocurre un desequilibrio entre las entradas de C (fotosíntesis o importaciones de alimentos) y las salidas de C (respiración, lixiviación, erosión y eliminación de productos) (Haque *et al.*, 2015). El nivel de entrada y formación de COS determina el equilibrio en el almacenamiento de COS. Un balance de COS negativo implica que la fertilidad del suelo está en riesgo por una disminución en el contenido de COS, mientras que un balance positivo indica que se forma COS adicional.

Albaladejo *et al.* (2019) han señalado que la cantidad de CO almacenado, en los 30 cm superficiales del suelo, difiere significativamente en función de los usos del suelo, tipo de suelo, altitud y textura; además, indicaron que los cambios de uso, de vegetación natural a cultivo, causa las mayores pérdidas de CO en el suelo, como consecuencia de la reducción de aportes orgánicos y la degradación de la estructura del suelo, que induce dicho cambio.



Por otra parte, se ha observado que el cambio de tierras de cultivo a bosques o pastizales aumenta las reservas de COS (Smith, 2018). Después de un cambio de uso del suelo, las modificaciones en los factores ambientales y del suelo afectan la dinámica del COS (Stehfest y Bouwman, 2006). Entre otros, mayores aportes de carbono, cambios en la calidad del COS, la protección del C por los agregados del suelo y la ubicación profunda del C del suelo pueden contribuir a la acumulación de COS cuando las tierras de cultivo se convierten en bosques o pastizales (Post y Kwon, 2000). Además, se ha demostrado que los sistemas de labranza y agricultura de baja intensidad han contribuido a la disminución de las existencias de COS en ciertas áreas agrícolas (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2018).

La rápida descomposición y mineralización de la MOS, conjuntamente con los severos procesos de degradación física, afectan seriamente la capacidad de sumidero de C de los suelos de los trópicos, generando una tasa de secuestro de C baja (Visconti y Valenzuela, 2019). La necesidad de mejorar la calidad del suelo también es más urgente en los suelos de los trópicos que en los suelos de latitudes altas debido a los bajos rendimientos de los cultivos (Lal, 2004a).

Las pérdidas de MOS propician el deterioro de varias propiedades del suelo que son esenciales para la protección y conservación del mismo, tanto desde el punto de vista agronómico como ambiental. El uso y manejo sostenible permite una adecuada MOS, y constituye un requisito previo de la agricultura sostenible capaz de hacer frente a la creciente demanda de alimentos y el mantenimiento del medio ambiente. La gestión adecuada de la MOS es, por lo tanto, un punto de inflexión esencial para el equilibrio de los sistemas naturales y el futuro de toda la sociedad humana (Mondini y Sequi, 2008).

El IPCC (2017) ha señalado que, para suelos minerales, los cambios en el almacenamiento de C se basan en el supuesto de que, dentro de una zona climática y tipo de suelo, el COS está en equilibrio bajo un uso de la tierra, un sistema de prácticas de gestión y un régimen de perturbaciones constantes. En consecuencia, cualquier cambio en el uso de la tierra y/o sistema de prácticas de gestión y/o régimen de perturbación provoca un cambio



de COS que se supone que ocurre linealmente a través de un período de tiempo, establecido por defecto en 20 años.

El COS no está distribuido uniformemente en amplias superficies, profundidades, tipos de suelos y posiciones de paisaje, por ello su medición con exactitud ha sido una preocupación constante y a su vez ha causado que no exista un único método para medir el contenido de COS. Los métodos que se han desarrollado en el pasado, como la oxidación en húmedo y en seco son todavía de uso común, especialmente en los países subdesarrollados. Se puede recomendar la combustión seca para la medición de COS en lugar del comúnmente usado y económico método Walkley-Black, debido a que este último requiere factores de corrección para la oxidación incompleta. Sin embargo, la combustión en seco tiene altos costos analíticos, y requiere una laboriosa preparación y destrucción de la muestra (FAO, 2017).

4. METODOLOGIA

4.1. Caracterización biofísica del área de estudio

4.1.1 Descripción del sitio de estudio

El área de estudio se ubicó en el Distrito de Riego del Río Zulia en la vereda Las Vacas del municipio de Cúcuta, departamento Norte de Santander, Colombia, con coordenadas geográficas de referencia 08°12'33" Norte y 72°31'13" Oeste, y una altitud de 70 msnm. La temperatura media anual es de 29 °C, la precipitación media anual es de 1900 mm, y según Holdridge el bioma se clasifica como Bosque Seco Tropical (IGAC, 2006). Los registros de la estación meteorológica local registraron que la precipitación acumulada durante el primer ciclo de cultivo fue de 776,2 mm y durante el segundo ciclo de cultivo fue de 417 mm.

El estudio se realizó en tres parcelas contiguas de un suelo clasificado como *Typic Udifluvents* (USDA Soil Taxonomy, 2014). Dos parcelas corresponden al cultivo de arroz, con un área aproximada de 2 hectáreas cada una, y la tercera es una parcela de 3 hectáreas de bosque nativo con cacao (árboles de Cacao), todas tienen más de 40 años bajo sus respectivos usos (Figura 1). En una de las parcelas con cultivo de arroz se realizaron cambios en el manejo de labranza y riego desde hace un año.



Figura 1. Imagen satelital del lugar de estudio tomada en enero de 2016 por Sentinel.



La parcela con uso de bosque con cacao se utilizó como suelo de referencia y está compuesta por árboles tropicales de porte alto donde sobresalen especies nativas como: la Ceiba (*Ceiba petandra*), el Jobo (*Spondias mombin*), el Roble (*Tabebuia rosea*) y el Higuerón (*Ficus luschnathiana*), los cuales sirven de sombra a los árboles de Cacao (*Teobroma cacao*) (Figura 2). El manejo del sistema agroforestal consiste en intervención reducida, con podas de mantenimiento del árbol de cacao una vez al año y cosecha de frutos dos veces al año; no se utilizan herbicidas, insecticidas o fungicidas.



Figura 2. Parcela de bosque con cacao (Agroforestal)

Se estudiaron los sistemas de cultivo de arroz durante dos ciclos de cultivo consecutivos y en dos parcelas para comparar diferentes sistemas de labranza y manejo del agua de riego. El sistema tradicional del cultivo de arroz, que tiene más de 40 años de uso, se identificó como arroz irrigado y consistió en labranza mecanizada en suelo inundado (fangueo o batido) y riego por inundación con recambio periódico de lámina de riego (Figura 3). El sistema de cultivo de arroz modificado, que tiene solo un año de uso, se identificó como arroz de secano y consistió en labranza mecanizada en suelo parcialmente seco y sin riego de inundación (Figura 4).



Figura 3. Parcela con cultivo de arroz irrigado.

Otras prácticas agronómicas fueron comunes en los dos sistemas de cultivo de arroz, caracterizadas por una siembra manual al voleo con semilla pregerminada de la variedad Fedearroz 2000. La aplicación de fertilizante también fue manual y a base de urea, cloruro de potasio y fórmula compuesta para aportar 150 Kg ha^{-1} de N, 80 Kg ha^{-1} de P y 120 Kg ha^{-1} de K según lo recomendado por Fedearroz (Federación de Arroceros de Colombia). Las aplicaciones de herbicidas preemergentes y postemergentes selectivos y el control químico de plagas y enfermedades se realizaron manualmente con máquinas asperjadoras de espalda. La cosecha de granos fue mecanizada y empacada en costales de 60 kg, los cuales fueron transportados fuera de las parcelas por tractor con carreta. Después de la operación de cosecha mecanizada, los residuos de cosecha (tamo) fueron quemados.



Figura 4. Parcela con cultivo de arroz de secano

Los registros de la temperatura ambiente máxima y mínima, así como de la precipitación mensual; durante los diez meses del estudio, proceden de la estación meteorológica del IDEAM, Las Vacas (16020250) se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Registro de Temperaturas máxima y mínima, y precipitación mensual en el sitio de estudio durante los meses del estudio

Variable Climática	De agosto 2016 a mayo 2017									
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Temp. Max. (°C)	34,9	33,5	32,3	31,8	31,1	34,2	34,7	33,8	33,3	32,5
Temp. Min. (°C)	23,8	23,5	23,5	23,5	22,8	23,5	23,8	23,9	23,5	23,5
Precipitación (mm)	49,2	139	221	218	139	12	15	18	197	175

4.1.2 Descripción del perfil de suelo

El suelo seleccionado para realizar esta investigación se encuentra en el valle del río Zulia, ocupando las áreas de banco o napa de desborde a lo largo del eje del río.

De acuerdo con el estudio general de suelos del departamento Norte de Santander este suelo forma parte de la Consociación Zulia y se clasifica como un *Typic Udifluvents*

(USDA Soil Taxonomy, 2014), con severas limitaciones por drenaje imperfecto y fuerte acidez (Figura 5). Desde hace más de cuarenta años la vegetación natural de bosque ha sido reemplazada por cultivos.



Figura 5. Primeros 10 cm de suelo con uso en cultivo de arroz

Desde el punto de vista químico son suelos que tienen reacción desde ligera a fuertemente ácida desde la superficie y hasta horizontes más profundos. La capacidad de intercambio catiónico es de media a baja, la saturación de bases es generalmente menor del 60%, aunque la relación calcio – magnesio es normal en el primer horizonte. El contenido de carbono orgánico es pobre en todos los horizontes y decrece irregularmente con la profundidad.

El mal uso que han tenido los suelos en mono cultivos permanentes del arroz con riego por inundación y prácticas de laboreo inadecuados ha generado un deterioro creciente de sus características físicas, químicas y biológicas.

A continuación, se realiza la descripción de los perfiles de suelo utilizados en campo (Tabla 2-3; Figura 6):

Tabla 2. Perfil de suelo en uso cultivo de arroz

Uso Arroz			
Imagen	Nomenclatura	Profundidad (cm)	Características
	Ap	0-13	Estructura tipo granular desarrollo fuerte, consistencia en humedo muy firme en seco muy fuerte, en mojado muy plástico y ligeramente pegajoso. Poros de tamaño fino y muy fino, cantidad escasos con EPT Medio. Raíces de tamaño finas y escasas en cantidad. Reacción al HCl ninguna, actividad biológica ninguna, manchas ninguna.
	ACg	13-36	Estructura blocosa y fuerte, consistencia muy fuerte en seco, muy firme en humedo, en mojado plástico y ligeramente pegajosos. Poros de tamaño finos y muy finos escasos en cantidad y EPT Medio. Raíces ninguna. Reacción al HCl ninguna y manchas ninguna.
	Cg1	36-80	Estructura masiva de desarrollo muy fuerte, consistencia en seco muy fuerte, en húmedo muy firme y en mojado plástico pegajoso. De poros muy finos y escasos con EPT bajo. Raíces ninguna, reaccion al HCl ninguna, actividad ninguna, manchas ninguna.
	Cg2	>80	Estructura masiva de desarrollo moderada, consistencia en seco fuerte, en humedo firme, en mojado no pegajosos no plastico. De poros muy finos, cantidad comunes EPT media. Raíces ninguna, reacción al HCl ninguna, actividad biológica ninguna y manchas rojas amarillentas.

Tabla 3. Perfil de suelo con uso en bosque con cacao (agroforestal)

Uso Bosque con cacao			
Imagen	Nomenclatura	Profundidad(cm)	Características
	A	0-10	Estructura de tipo granular de desarrollo moderado, consistencia en seco fuerte, en humedo firme en mojado plástico y pegajoso. Poros de tamaño grueso, medio y fino, abundantes en cantidad. Raíces abundantes gruesas medias y finas. Reaccion al HCl ninguna, actividad biológica abundante y manchas ninguna.
	C1	10 a 30	Estructura prismatica de desarrollo fuerte, consistencia fuerte en seco, en humedo muy firme, en mojado pegajosa y plástica. Poros de tamaño finos y muy finos, abundantes en cantidad. Raíces escasas. Reacción al HCl ninguna, actividad biológica escasa y manchas ninguna.

La composición mineralógica del suelo se evaluó a través del difractograma de rayos X, el cual reveló como los minerales más abundantes son los siguientes: cuarzo (56%), muscovita (22%), caolinita (8%) y esmectitas (5%) (tabla 4). Esta diversidad

mineralógica se asocia con el origen aluvial del suelo, donde los aportes de sedimentos hidromórficos ha prevalecido. Por ello se observa la presencia de minerales meteorizables conjuntamente con minerales de avanzado estado de meteorización.

Tabla 4. Composición mineralógica del suelo estudiado.

Compound Name	Formula	I/Ic DB	I/Ic User	S-Q	System	Space Group	Quality
Quartz	Si O ₂	3,05	0	56%	Hexagonal	P3221 (154)	Star (*)
Muscovite-2M1	K Al ₂ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (O H) ₂	-1	0,8	22%	Monoclinic	C2/c (15)	Indexed
Kaolinite-1Ad	Al ₂ Si ₂ O ₅ (O H) ₄	-1	1	8%	Triclinic	C1 (1)	Blank
Chlorite-vermiculite-montmorillon	Na _{0.5} Al ₆ (Si , Al) ₈ O ₂₀ (O H) ₄	-1	0	5%			Low precision
Albite, ordered	Na Al Si ₃ O ₈	2,1	0	4%	Triclinic	C-1 (2)	Star (*)
Pyrophyllite	Al _{0.33} Si _{0.67} O _{1.67} (O H) _{0.33}	0,56	0	3%	Monoclinic	C2/m (12)	Blank
Cordierite	Mg _{1.9} Fe _{0.1} Al ₄ Si ₅ O ₁₈ (H ₂ O) ₂	0,98	0	2%	Orthorhombic	Cccm (66)	Blank
Lepidocrocite	Fe O (O H)	3,6	0	0,5%	Orthorhombic	Cmcm (63)	Indexed
Vermiculite	Mg ₃ ((Al Si ₃ O ₁₀) (O H)) (OH) ₂	21,17	0	0,3%	Monoclinic	Cc (9)	Indexed



Figura 6. Perfiles de suelo cultivo de arroz irrigado, arroz seco y bosque con cacao respectivamente

4.2 Diseño del muestreo

El muestreo se llevó a cabo durante diez meses continuos desde agosto de 2016 hasta mayo de 2017, donde se realizó una estrategia sistemática para muestrear a distintas profundidades de suelo (0-10, 10-30 y 30-60 cm) en cada parcela, que consistió en tomar tres puntos equidistantes en un transecto diagonal. En cada punto de muestreo, la intersección y los extremos de una cruz imaginaria de un metro de largo por cada lado sirvieron para tomar cinco submuestras de suelo alterado para formar una muestra compuesta de suelo superficial. En cada punto también se tomaron dos muestras inalteradas con cilindros metálicos de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro. Los muestreos se realizaron simultáneamente en las tres parcelas cada 30 días durante dos ciclos consecutivos de cultivo de arroz, comenzando en agosto de 2016 en la etapa de descanso antes de la labranza del primer ciclo, siendo la segunda etapa en septiembre de 2016 después de la labranza y siembra, la tercera etapa fue en octubre de 2016 después del macollamiento, la cuarta etapa fue en septiembre de 2016 durante la floración y la quinta etapa en noviembre de 2016 inmediatamente después de la cosecha. Durante el segundo ciclo, el muestreo se realizó de la misma manera, en enero, febrero, marzo, abril y mayo de 2017.

4.2.1 Medición de las variables físicas, químicas y específicas del carbono en el suelo

En el campo, la temperatura superficial del suelo se midió con un termómetro de mercurio y el contenido volumétrico de humedad se midió con un sensor dieléctrico. La distribución de partículas minerales del suelo se determinó por el método de Bouyoucos. La densidad aparente (D_a) y la porosidad se midieron utilizando un cilindro metálico tipo Uhland (Pla, 1983). El contenido de agua a -33 kPa se midió con cámaras Richards de Soil Moisture Equipment Corp (Pla, 2010). La biomasa microbiana del suelo (COBM) se midió indirectamente mediante el método de respiración inducida por sustrato (glucosa) en muestras de suelo alteradas que se mantuvieron refrigeradas (4 °C) desde el muestreo hasta su análisis (Lozano, 2005), y se expresó en miligramos de COBM kg^{-1} del suelo. La determinación de carbono orgánico del suelo COS se realizó mediante un método

modificado de Walkley y Black (IGAC, 2016). El pH del suelo y la conductividad eléctrica (CE) se midieron en una suspensión 1:1 de suelo y agua. Para la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo se utilizó el método del acetato de amonio 1N pH 7 (IGAC, 2016) (Tabla 5).

Tabla 5. Metodologías para medir propiedades físicas y químicas del suelo

Propiedades del suelo	Metodología empleada	Referencia
Distribución de partículas minerales	Bouyoucos y utilización de tamices	(IGAC, 2006)
Densidad aparente (Da)	Método del cilindro metálico tipo Uhland.	(Pla, 2010)
Espacio poroso total (EPT)	Método del cilindro metálico tipo Uhland.	(Pla, 2010)
Contenido de humedad a - 33 KPa (Capacidad de campo)	Olla de presión tipo Richard.	(Pla, 2010)
pH del suelo	Método Potenciómetro en suspensión 1:1 en agua	(IGAC, 2006)
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Método Volumétrico. acetato de Amonio 1N pH 7	(IGAC, 2006)
Conductividad eléctrica (CE)	Conductímetro en suspensión 1:1 en agua	(IGAC, 2006)

Las metodologías analíticas específicas para medir el C se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Metodologías analíticas específicas para medir el C

Variable	Metodología empleada	Referencia
Calidad de C	RMN ¹³ C CP MAS E IR (infrarrojo)	(Acosta, J.A et al., 2018)
C en agua	Lixiviados TOC	(Acosta, J.A et al., 2018)
Necromasa	MADS	(Quiceno y Tangarife, 2013)
CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Cromatografía de gases e IR	(CIAT, 2016)
Carbono orgánico (CO)	Método de digestión acida Walkley y Black.	(IGAC, 2006)
Biomasa microbiana (COBM)	Método de incubación inducida por sustrato.	(Lozano et al. 2005)

4.2.2 Medición del carbono orgánico de la necromasa

La biomasa vegetal de la vegetación aporta carbono orgánico a los suelos a través de la necromasa. Para medir la necromasa en el suelo, se recolectaron todos los residuos de material vegetal encontrados sobre el suelo en diez puntos de muestreo distribuidos aleatoriamente en cada una de las parcelas estudiadas. La recolección de la necromasa se realizó en las mismas fechas del muestreo de suelo utilizando marcos de 0,25 m². En cada día de muestreo se utilizó una balanza digital portátil para determinar el peso fresco total de necromasa recolectada. Las muestras se mezclaron homogéneamente y luego se tomaron tres submuestras de aproximadamente 300 g, las cuales se secaron en estufa a 72 °C hasta peso constante, para determinar el peso seco de la necromasa y calcular el porcentaje de materia seca (Vargas-Parra *et al.*, 2007).

$$\%MS = \frac{\text{Peso de muestra seca}}{\text{Peso fresco de la muestra}} \times 100 \quad \text{BN} = \frac{\text{Pm} \times \text{MS}(\%)}{100}$$

Donde, %MS es el porcentaje de materia seca en la necromasa, BN es la biomasa total de la necromasa y Pm es el peso fresco total de la necromasa de cada muestra.

Para estimar el carbono orgánico almacenado en la biomasa de la necromasa, se utilizó la siguiente ecuación basada en que la biomasa contiene alrededor del 50 % de carbono orgánico (Ibrahim *et al.*, 2007, Malhi *et al.*, 2009, Fonseca-González, 2017).

$$\text{CO de Necromasa} = \text{BN} \times 0.5$$

4.2.3 Medición del carbono orgánico de las raíces

Las raíces de las plantas representan otro importante aporte de carbono orgánico al suelo. Para medir el aporte de las raíces en cada parcela, en el muestreo de la quinta etapa y en los mismos diez lugares de muestreo de necromasa, se recolectaron muestras de suelo superficial para separar raíces por lavado con agua y tamizado (4,1; 2,36 y 1,18 mm de abertura de malla). Posteriormente, las raíces recolectadas se secaron en estufa a 72 °C hasta peso constante. Se asumió que el carbono orgánico de las raíces se compone de un 50 % de carbono (Ibrahim *et al.*, 2007; Malhi *et al.*, 2009, Fonseca-González, 2017).

4.2.4 Medición de pérdidas de carbono orgánico por emisiones de gases a la atmósfera

Las pérdidas de carbono orgánico del suelo se midieron a través de los flujos de CH₄ y CO₂ entre el suelo y la atmósfera utilizando la metodología de Cámara Estática Modificada (Haque *et al.*, 2015; Irisarri *et al.*, 2012; Fortin *et al.*, 1992). Las cámaras estáticas diseñadas para este estudio consistieron en recipientes de PVC cilíndricos de dimensiones de 25 cm de diámetro y 35 cm de altura, los cuales fueron colocados simultáneamente al momento de tomar las muestras de aire sobre una base de PVC de 25 cm de diámetro y 5 cm de altura que permaneció enterrada en el suelo durante todo el período del experimento. La unión de ambas partes se aseguró mediante una goma plástica para evitar el escape de los gases. Para lograr el aislamiento térmico de las cámaras, se recubrieron con una membrana aislante de espuma de polietileno aluminizado de 1 cm de espesor. En la parte superior de la cámara se instaló un pequeño puerto de muestreo con un

septum de plástico a través del cual se extrajeron las muestras gaseosas. Se tomaron muestras de gas durante 40 min a intervalos de 0, 10, 20 y 40 min después de la instalación de la cámara. La recolección de las muestras de gas se realizó con una jeringa de plástico de 20 ml equipada con una válvula para evitar el escape del gas. Esto permitió obtener una muestra de 20 ml de los cuales solo se almacenaron 15 ml en un tubo de vidrio (vial) de 20 ml al vacío.

Posteriormente, los viales debidamente sellados fueron enviados al laboratorio de Isótopos Estables del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) para ser analizados en un cromatógrafo de gases de marca Shimadzu GC-14^o, con detector de ionización de llama (FID) y detector de captura de electrones (ECD), equipado con una precolumna y una columna Porapak Q (80-100 mesh) de 1 y 2 m de longitud respectivamente. La fase móvil fue nitrógeno de alta pureza con un flujo de 22 mL min⁻¹. Las temperaturas del horno, inyector y detector fueron 70 °C, 80 °C y 320 °C, respectivamente. El tiempo de retención fue de 2,64 minutos para el metano.

Para el análisis de dióxido de carbono se utilizó un analizador infrarrojo de CO₂ con trampa de NaOH y sílica gel para retener el dióxido de carbono y la humedad que proviene del aire. La fase móvil fue aire con un flujo de 75 ml min⁻¹. El tiempo de análisis para cada muestra fue de 2 minutos.

El flujo (flux) para los gases se calculó a partir de los datos de concentración de CH₄ y CO₂ obtenidos a partir de cuatro intervalos de medición, utilizando la siguiente ecuación (Haque *et al.*, 2015; Irisarri *et al.*, 2012):

$$\text{Flux}_{(\text{Gas})} = \frac{\Delta C_i \text{ concentración}}{\Delta t_i \text{ tiempo}} \cdot V_{\text{camara}} / A_{\text{área}} = \frac{(C_2 - C_1)}{(t_2 - t_1)} \cdot H_a$$

Dónde:



Flux (Gas): es el flujo de CH₄, o CO₂ en (mg m⁻² h⁻¹)

V(cámara) y A(área): representan el volumen y el área transversal de la cámara en m³ y m² respectivamente.

Ha: es la altura de la cámara sobre la interfase aire-suelo en metros.

$\Delta C_i / \Delta t_i$: puede calcularse por regresión lineal como la pendiente de la curva de concentración frente al tiempo en la que “t_i” representa el tiempo de muestreo (en horas) y C_i la concentración de CH₄, o CO₂ en mg m⁻³, medida en el intervalo “i” con la siguiente ecuación.

$$C_i (\text{mg m}^{-3}) = C_{\text{cromatografía}} (\text{ppm}) \cdot \frac{PM \times P}{0.082 \times T_{\text{campo}}}$$

Dónde:

C_{cromatografía}: es la concentración en ppm– volumen (ml m⁻³) de cada gas, reportada en el análisis cromatográfico.

T_{campo}: es la temperatura en la cámara en el momento del muestreo, en K.

P: es la presión atmosférica, en atmósferas.

PM: es el peso molecular de cada gas, en g mol⁻¹.

4.3 Cálculo del balance de carbono orgánico en el suelo superficial

La dinámica del carbono orgánico del suelo se puede estimar a partir del balance entre los aportes o entradas y las pérdidas o salidas que ocurren en el suelo. Una disminución en el carbono orgánico total en el suelo ocurre cuando hay un balance negativo, es decir las pérdidas son mayores a los aportes. En este estudio para estimar el balance de COS en dos ciclos de cultivo de arroz consecutivos (5 meses cada uno, para un total de 10 meses), se consideraron los aportes de carbono orgánico a partir de la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de urea, las raíces en el suelo superficial (0 a 10 cm), y la biomasa microbiana y necromasa. Las emisiones totales de CO₂ y de CH₄ del ciclo de 5 meses se



expresaron en kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}) se consideraron como salidas o pérdidas de carbono orgánico (CO), ya que las pérdidas por erosión o lixiviación se consideraron insignificantes en este estudio.

En este estudio se considera el carbono orgánico de la biomasa microbiana (COBM) como un insumo del balance del carbono orgánico del suelo (COS), ya que la evidencia reciente señala que los residuos de la biomasa microbiana (necromasa microbiana) se pueden contabilizar como fuente de COS (Six *et al.*, 2006). En este sentido, Miltner *et al.* (2012) sugieren que el 50 % del C derivado de la biomasa permanece en el suelo, principalmente en la parte no viva de la MOS (40% del C de la biomasa añadida), debido a que las envolturas de las paredes celulares de las bacterias y hongos se estabilizan en el suelo y contribuyen significativamente a la formación de MOS de partículas pequeñas.

Para el cálculo del balance de COS, las entradas y salidas se expresaron en kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}), lo cual se logró estimando el peso del suelo superficial a partir de la densidad aparente (Da) promedio de cada parcela.

4.4 Calidad por ^{13}C RMN-CP y/o IR (infrarrojo).

4.4.1 Calidad del Carbono (Técnica ^{13}C RMN-CP Resonancia Magnética Nuclear)

La espectroscopía de resonancia magnética nuclear es una técnica no destructiva utilizada para identificar la estructura química de la materia orgánica del suelo sin alterar su composición (Faz *et al.*, 2002; Almendros, 2004). Como técnicas alternativas para el análisis de la MOS en macromoléculas heterogéneas, existen métodos de espectroscopía como la resonancia magnética nuclear (RMN), que mejoran el conocimiento sobre el secuestro de C y su ciclo en el suelo (Kögel-Knabner, 2000). La técnica CP MAS ^{13}C RMN es usada normalmente para la medida de la distribución de varias formas de carbono que se encuentran en la materia orgánica y permite obtener información, directamente y de manera no destructiva, de los componentes del carbono sin separación química o física (Preston,



1996; Preston *et al.*, 1998; Stevenson, 1994). La señal del RMN es proporcional a la concentración del núcleo (^{13}C) que crea esa señal (Kögel-Knabner, 2000; Stevenson, 1994). Si bien la interpretación de los espectros de resonancia en términos cuantitativos ha de realizarse con prudencia, varias investigaciones concluyen que los espectros reflejan con elevada resolución la proporción de los distintos tipos de carbonos que componen la MOS, siempre que ésta carezca de altos contenidos de materiales paramagnéticos y se ajusten adecuadamente los tiempos de contacto (Pontevedra-Pombal *et al.*, 2001).

En el análisis de las muestras de suelo, se empleó un espectrómetro Varian Unity 300 con rotores de nitruro de silicio de 7 mm de diámetro externo y 5,6 mm de diámetro interno, sellados con tapones Kel-F. Las medidas de ^{13}C CPMAS fueron realizadas a 4 KHz de velocidad de giro, con una frecuencia del ^{13}C $\nu_{\text{rf}}=75\ 420$ MHz. El tiempo de contacto $t_{\text{p}}=1,5$ ms. El espectro fue adquirido con un tiempo de reciclado de 4s y pulso de 90° $\tau_{\text{p}}=6,7$ μs . La anchura espectral $\text{sw}=50\ 000$ Hz; scans $n_{\text{t}}=60\ 000$ y línea de ampliación de 100 Hz. El porcentaje de grupos funcionales fue calculado dividiendo cada espectro RMN en las siguientes regiones químicas de cambio: (1) 0-50 ppm (alquilos); (2) 50-112 ppm (O-alquilos); (3) 112-163 ppm (aromáticos); (4) 163-190 ppm (carboxílicos). Las áreas resultantes de las regiones químicas de cambio fueron integradas y se expresan como un porcentaje del área total (Faz *et al.*, 2002). Las muestras se dejaron 19 horas y otras hasta 2 días y 14 horas en el analizador a pesar de que se espera que en la primera hora ya se observe entre el 40-50% de los grupos de carbono.

Para el caso de estudio se analizaron muestras de suelos contrastantes por ^{13}C RMN correspondientes a las parcelas de: arroz irrigado, arroz de secano y bosque con cacao para los primeros 10 cm de profundidad del perfil de suelo al inicio y al final del ciclo del cultivo de arroz.



4.4.2 Espectro de Infrarrojo

Comprende el infrarrojo medio ($4000-400\text{ cm}^{-1}$) y cercano ($14286-4000\text{ cm}^{-1}$). El rango espectral y la calidad del espectro obtenido, dependen de las características del espectrofotómetro utilizado. El método descrito permite obtener el espectro de infrarrojo de un suelo u otra matriz sólida (p.e. residuo). Dicho espectro se basa en la propiedad de los enlaces covalentes de absorber radiación infrarroja y vibrar. El tipo de enlace excitado y vibración dependerá de la frecuencia de la radiación incidente. De esta forma se obtiene un espectro que es característico de cada suelo y que contiene información detallada sobre su composición química en lo que se refiere a mineralogía (p.e., minerales de arcilla, cuarzo, carbonatos, yeso, óxidos de aluminio) y presencia de materia orgánica (Vand der Marel y Beutesslpacher, 1976; Nguyen *et al.*, 1991; Janik *et al.*, 1998; Soriano-Disla *et al.*, 2014).

A partir del espectro infrarrojo se pueden inferir ciertas propiedades del suelo mediante el desarrollo de modelos multivariantes. La técnica también permite trabajar directamente con los espectros sin necesidad de llevar a cabo modelos previos.

La metodología que se describe corresponde a la obtención de espectros de infrarrojo en condiciones de laboratorio. No obstante, también existen instrumentos de campo para los cuales se precisa de una metodología particular (Acosta *et al.*, 2018).

Se preparó una muestra de suelo tamizada ($<2\text{mm}$) y molida entre 20 y 30 g. El espectrofotómetro se debe encender media hora antes de trabajar. La configuración recomendada del espectrofotómetro consiste en número de barridos 32, resolución 4 cm^{-1} , distancia entre frecuencias 2 cm^{-1} , corrección por $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ recomendada, tasa de apodización media, unidades Log (1/R), velocidad de escaneo 2 cm/S . En cuanto al control de las condiciones de funcionamiento del instrumento cada vez que se trabaje se recomienda comprobar la existencia de niveles óptimos de energía, así como el *single beam spectrum*. Asimismo, se recomienda escanear muestras de suelos con espectros conocidos.

Se procede a escanear la muestra *background* (preferiblemente hecha de oro, aunque se aceptan discos de SiC). Se debe repetir el proceso tras aproximadamente 45

minutos de utilización. Transferir la muestra (1 g aproximadamente) al receptor de la muestra. Si el método de medida es *attenuated total reflectance* (ATR), presionar la muestra con el accesorio del instrumento utilizando el valor de presión recomendado por el fabricante. Si el método de medida es *diffuse reflectance infrared Fourier-Transform* (DRIFT) asegurarse que la superficie de la muestra este nivelada (sin presionar) antes de introducir dentro del instrumento para su medición.

Un espectro típico viene expresado en unidades de absorbancia para las distintas frecuencias que componen el rango espectral del instrumento. Este espectro es directamente utilizable y su uso dependerá del objetivo concreto de la investigación. Los programas de control de los instrumentos suelen tener herramientas estadísticas que permiten trabajar con espectros generados. Otra posibilidad consiste en trabajar con otros programas que pueden ser específicos, o no, para tratar datos espectrales. Los primeros suelen contar con macros para importar espectros provenientes de distintos instrumentos. En el caso de los segundos, puede ser necesaria la conversión previa de los espectros a un formato reconocible (por ejemplo, csv, xlsk) (Acosta *et al.*, 2018).

4.5 Determinación de carbono soluble (carbono orgánico en agua de riego)

Se tomaron las muestras de agua de entrada y salida de cada una de las parcelas y se analizó el TOC para determinar si hay pérdidas o ganancias de CO en el sistema.

Para determinar el carbono orgánico total en el agua, fue necesario el equipo de medición de carbono total “TORCH o TOC”, el cual usa la combustión a alta temperatura para la oxidación del material carbonoso a dióxido de carbono (CO₂), siguiendo por la detección infrarroja no dispersiva (NDIR) del producto del CO₂, las variables del carbono pueden ser independientemente determinado seleccionando un método de instrumento predefinido, las cuales incluyen:

- Total de carbono (TC).
- Carbono Inorgánico (IC).



- Carbono Orgánico Total (TOC = TC-IC).
- Carbono orgánico no purgable (NPOC o TOC por rociado).

Se preservaron las muestras en refrigeración para evitar la degradación de la materia orgánica y de esta manera realizar la medición del equipo.

Se programó el equipo con la opción para medir Carbón Orgánico Total (COT), y se procedió a introducir la muestra en los frascos especiales para que el equipo pudiera realizar la medición.

También se evaluó la presencia de los carbonatos y bicarbonatos en el agua del suelo, cuyo resultado fue de cero, indicando ninguna presencia de los mismos.

4.6 Análisis de los datos

Los datos se analizaron con el software estadístico Stat graphics Centurion 16° mediante un análisis de varianza (ANOVA), después de verificar los supuestos de normalidad con la prueba de Anderson-Darling y el supuesto de homogeneidad de la varianza mediante la prueba de Levene. En caso de la violación de estos supuestos, los datos se analizaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskal y Wallis. En la comparación de medias se aplicó la prueba de diferencia mínima significativa a un nivel de confianza de 0,05%. Adicionalmente se utilizó el índice de correlación de Pearson para establecer el grado y tipo de asociación entre cada variable.

Para el caso de espectrofotometría por infrarrojo se realizó un análisis multivariado y sustracciones espectrales, el análisis de componentes principales (PCA), los promedios espectrales y las sustracciones se calcularon utilizando el software GRAMS/AI y GRAMS/IQ, versión 9.1 (Thermo Galactic).



5. RESULTADOS

5.1 Propiedades físicas y químicas del suelo superficial estudiado

Hay propiedades intrínsecas del suelo que están directamente relacionadas con la pedogénesis (origen y evolución) del suelo y cuyo estado no depende de los factores considerados en el experimento de campo del presente proyecto. Especialmente importante es considerar que estas propiedades son intrínsecas del suelo, sustancialmente permanentes o sujetas solo a cambios surgidos de la evolución pedogenética del mismo. Sin embargo, las mismas sirven para realizar una interpretación sobre el medio físico existente en cada uno de los horizontes del perfil de suelo. Estas propiedades físicas son: la distribución de partículas minerales, la clase textural, tipo, clase y grado de estructura, la consistencia, y la densidad real.

El análisis de la distribución de tamaño de partículas minerales del suelo en las parcelas de estudio (Figuras 7-9) mostró la dominancia de las arcillas en las parcelas de arroz irrigado y arroz de secano en todo el perfil. Mientras que la parcela agroforestal de bosque con cacao mostró una dominancia de los limos en el perfil. Se observó que, en el suelo de las tres parcelas, las partículas minerales se presentaron en los siguientes rangos: las arcillas de 63,2% a 33,4%, las arenas de 20,8% a 3% y los limos de 54,9% a 33,6%.

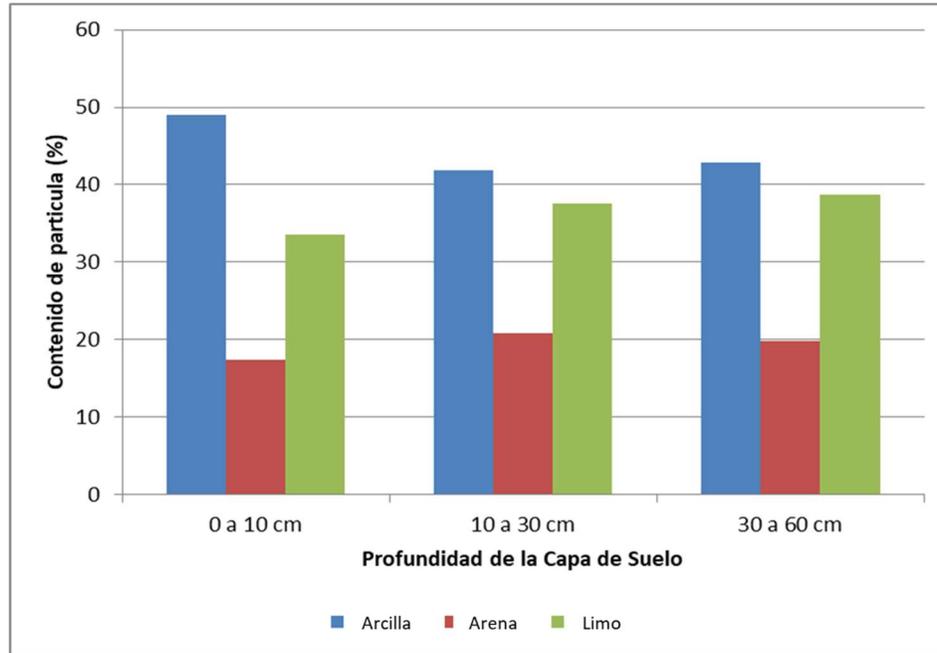


Figura 7. Distribución de partículas minerales del suelo en función de la profundidad en el suelo de la parcela de arroz irrigado

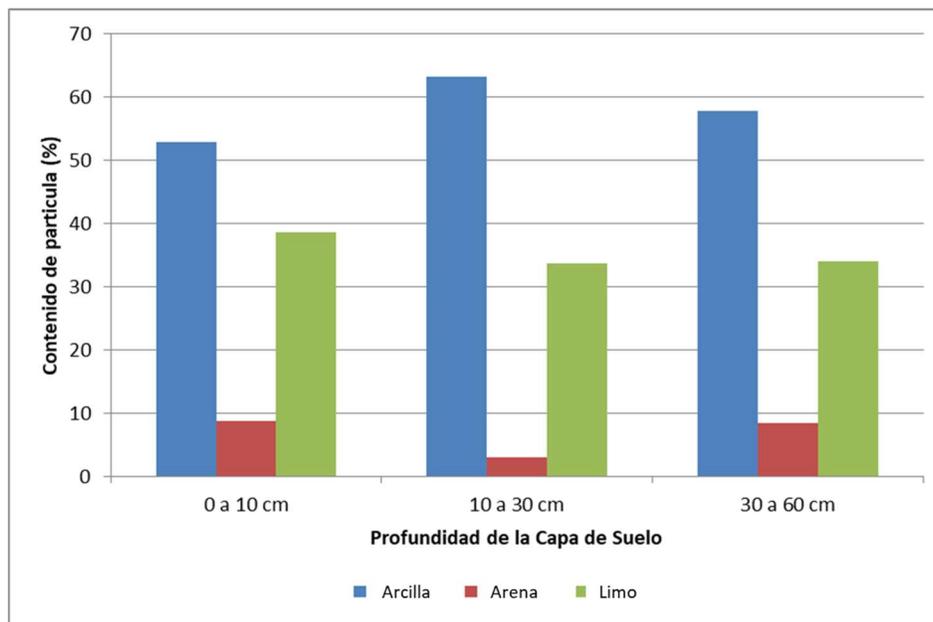


Figura 8. Distribución de partículas minerales del suelo en función de la profundidad en el suelo de la parcela de arroz de secano.

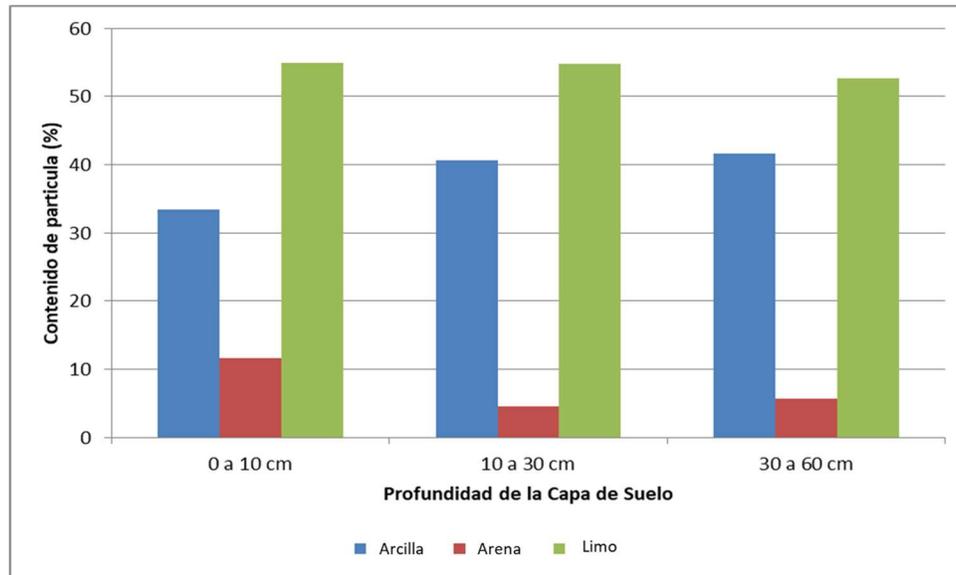


Figura 9. Distribución de partículas minerales del suelo en función de la profundidad en el suelo de la parcela del sistema agroforestal del bosque con cacao.

En el suelo de las parcelas de arroz irrigado y arroz de secano se observa que en todo el perfil la clase textural es la arcillosa, mientras que el suelo de la parcela del sistema agroforestal de bosque con cacao el horizonte superficial es de clase textural franco arcillo limoso y en profundidad es arcillo limoso.

Las parcelas de arroz irrigado y arroz de secano, presentan coincidencia textural explicable en que pertenecen a un mismo pedón, que de hecho es parte de una misma explotación agrícola (Tabla 7). Por el contrario, la parcela agroforestal de bosque con cacao, difiere en textura de las otras parcelas porque a pesar de la proximidad constituye otro pedón que pertenece a otra parcela agrícola. Estas variaciones son debidas a la variabilidad edáfica y particularmente al hecho que estos son suelos de origen aluvial.



Tabla 7. Clase textural de cada horizonte en el perfil de suelo de cada parcela experimental

Profundidad (cm)	Arroz Irrigado	Arroz Secano	Agroforestal (bosque con cacao)
0-10	Arcilloso	Arcilloso	Franco arcillo limoso
10-30	Arcilloso	Arcilloso	Arcillo limoso
30-60	Arcilloso	Arcilloso	Arcillo limoso

Con respecto a la estructura del suelo (Tabla 8), encontramos que, en las parcelas de arroz irrigado y arroz de secano, los suelos muestran gran similitud en su tipo de estructura, clase, grado de desarrollo y consistencia, coincidente con el hecho de tener la misma clase textural y tener el mismo historial pedogenético y de manejo. Se evidencia una estructura de tipo masiva en los dos horizontes superiores, lo cual obedece a que la mecanización intensiva por batido o fanguero de suelos arcillosos destruye los agregados y crea una masa de suelo. La consistencia plástica, firme y extra dura, obedece a la predominancia de arcillas.

Por otra parte, en el suelo del sistema agroforestal de bosque con cacao, la clase, el grado de desarrollo, consistencia en seco, húmedo, mojado y forma de los agregados individuales son diferentes a profundidades superficiales y subsuperficiales, hecho que está relacionado con las actividades biológicas, y la relación suelo-planta, como resultado el suelo tiene un tipo de estructura granular en el horizonte superior. La consistencia presente en el horizonte superficial es ligeramente plástica y ligeramente dura, probablemente debido a la dominancia de los limos. En el horizonte de 10 a 30 cm, se presenta una estructura tipo migajosa, que se explica en la dominancia de los limos y la poca evolución pedogenética del suelo. Su clase, grado y consistencia se corresponden con la dominancia de los limos y arcillas.

Con respecto al horizonte de 30 a 60 cm, en las tres parcelas se encontró una estructura de tipo bloques subangulares y con las mismas condiciones de clase, grado y consistencia.



Tabla 8. Caracterización de la estructura de cada horizonte del perfil en las parcelas de arroz irrigado, arroz seco y agroforestal

Uso	Profundidad	Tipo	Clase	Grado	Consistencia en seco	Consistencia en húmedo	Consistencia en mojado
Arroz Irrigado	0 - 10	Masiva	Fina y media	Fuerte	Muy dura	Muy firme	Plástico
	10 - 30	Masiva	Fina y media	Fuerte	Extra dura	Muy firme	Plástico
	30 - 60	Bloques subangulares	Fina y media	Fuerte	Extra dura	Muy firme	Plástico
Arroz seco	0 - 10	Masiva	Fina y media	Fuerte	Extra dura	Muy firme	Plástico
	10 - 30	Masiva	Fina y media	Fuerte	Extra dura	Muy firme	Plástico
	30 - 60	Bloques subangulares	Fina y media	Fuerte	Extra dura	Muy firme	Muy plástico
Agroforestal (Bosque con cacao)	0 - 10	Granular	Fina y media	Moderada	Ligeramente dura	Firme	Ligeramente pegajosa
	10 - 30	Migajosa	Fina y media	Fuerte	Muy dura	Muy firme	Muy pegajosa
	30 - 60	Bloques subangulares	Fina y media	Fuerte	Muy dura	Muy firme	Muy pegajosa

La superficie del suelo (0 a 10 cm) de las parcelas estudiadas mostró importantes diferencias estadísticas en la humedad del suelo a -33KPa, la temperatura de la superficie del suelo, la densidad aparente (D_a), la porosidad, el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Tabla 9). La parcela del bosque con cacao presentó menores valores de densidad aparente, junto con valores más bajos de porosidad total y humedad a capacidad de campo (-33KPa). Mientras que las parcelas destinadas al cultivo de arroz expresaron valores mayores de densidad aparente (D_a), conjuntamente con valores menores de porosidad total y humedad a capacidad de campo (-33 KPa). En cuanto

a la humedad del suelo en el momento de cada muestreo, el suelo de la parcela con arroz irrigado presentó mayor humedad, seguido del bosque con cacao y con menor humedad el suelo en arroz de secano. Por su parte, la temperatura superficial del suelo media más baja se encontró en el bosque con cacao y la más alta en el suelo de arroz secano. El pH en el suelo del bosque con cacao es moderadamente ácido, pero en las parcelas con arroz fue fuertemente ácido. Los suelos superficiales de las tres parcelas tienen baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), siendo el bosque con cacao el suelo con el mayor valor. Por otra parte, se observa que la conductividad eléctrica (CE) en todas las parcelas fue baja y no muestra presencia de sales.

Tabla 9. Propiedades físicas y químicas del suelo a profundidad de 0 a 10 cm en cada parcela.

Propiedad del Suelo		Parcela 1 Arroz irrigado	Parcela 2 Arroz en secano	Parcela 3 Agroforestal (Bosque con Cacao)
Humedad a -33KPa (%)	Media	31,36	36,72	44,98
	Desviación S.	4,04	2,36	3,59
Humedad al muestreo (%)	Media	23,36	18,72	21,98
	Desviación S.	9,14	2,52	7,68
Temperatura superficial (°C)	Media	27,98	28,58	25,07
	Desviación S.	1,05	2,48	1,05
Da (Tn m ⁻³)	Media	1,28	1,32	1,16
	Desviación S.	0,09	0,12	0,14
Porosidad total (%)	Media	45,88	47,12	50,06
	Desviación S.	5,46	4,49	4,21
pH (agua 1:1)	Media	5,27	5,23	5,62
	Desviación S.	0,37	0,35	0,42
CE (uS cm ⁻¹)	Media	93,78	78,04	117,21
	Desviación S.	30,47	27,28	65,02
CIC (cmol kg ⁻¹)	Media	9,95	11,76	13,76
	Desviación S.	3,14	2,59	3,01

Para el caso de la profundidad de 10 a 30 cm del suelo (Tabla 10), la parcela del bosque con cacao presentó menores valores de densidad aparente, junto con valores más altos de porosidad total y humedad a capacidad de campo (-33KPa). Mientras que las parcelas destinadas al cultivo de arroz mostraron valores mayores de densidad aparente

(Da), menores valores de porosidad total y mayor humedad a capacidad de campo (-33 KPa). En cuanto a la humedad del suelo en el momento de cada muestreo, el suelo de la parcela de bosque con cacao presentó mayor humedad, seguido de arroz con riego y con menor humedad el suelo en arroz de secano. Por su parte, la media más baja de la temperatura superficial del suelo se encontró en el bosque con cacao y la más alta en el suelo con arroz seco. El pH en el suelo del bosque con cacao es moderadamente ácido al igual que en las parcelas con arroz. Los suelos de las tres parcelas tienen baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), siendo el suelo del bosque con cacao el de mayor valor. Por otra parte, se observa que la conductividad eléctrica (CE) en todas las parcelas fue baja, sobre todo en el suelo del bosque con cacao, no mostrando presencia de sales.

Tabla 10. Propiedades físicas y químicas del suelo a profundidad de 10 a 30 cm en cada parcela.

Propiedad del Suelo		Arroz con riego	Arroz de secano	Bosque con Cacao
Humedad a -33KPa (%)	Media	35,40	34,43	36,92
	Desviación S.	3,87	4,65	4,07
Humedad al muestreo (%)	Media	29,19	28,41	33,57
	Desviación S.	4,17	3,99	4,743
Temperatura superficie (°C)	Media	27,01	27,06	25,99
	Desviación S.	1,79	2,13	4,48
Da (Tn m ⁻³)	Media	1,49	1,50	1,35
	Desviación S.	0,11	0,08	0,11
Porosidad (%)	Media	42,83	43,79	47,12
	Desviación S.	3,92	4,65	3,77
pH	Media	5,67	5,86	5,60
	Desviación S.	0,60	0,51	0,44
CE (uS cm ⁻¹)	Media	81,86	82,15	76,94
	Desviación S.	35,03	45,32	43,89
CIC (cmol kg ⁻¹)	Media	7,23	7,05	8,57
	Desviación S.	2,23	2,60	2,36

Y finalmente en la profundidad de 30-60 cm de suelo (Tabla 11), la parcela del bosque con cacao presentó menores valores de densidad aparente, junto con valores más altos de porosidad total y humedad a capacidad de campo (-33KPa). Mientras que las parcelas destinadas al cultivo de arroz expresaron valores mayores de densidad aparente (Da), conjuntamente con valores menores de porosidad total y humedad a capacidad de campo

(-33 KPa). Con respecto a la humedad del suelo en el momento de cada muestreo, el suelo de la parcela de bosque con cacao presentó mayor humedad, seguido de arroz de secano y con menor humedad el suelo en arroz irrigado. Para la temperatura superficial del suelo, la temperatura media más baja se encontró en el bosque con cacao y la más alta en el suelo con arroz irrigado. El pH en el suelo del bosque con cacao es moderadamente ácido al igual que en las parcelas con arroz. Los suelos de las tres parcelas tienen baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), siendo suelo del bosque con cacao el de mayor valor, seguido de arroz en secano. Por otra parte, se observa que la conductividad eléctrica (CE) en todas las parcelas fueron bajas sobre todo en el suelo de arroz irrigado, no observándose presencia de sales.

Tabla 11. Propiedades físicas y químicas del suelo a profundidad de 30 a 60 cm en cada parcela.

Propiedad del Suelo		Lote 1 Arroz con riego	Lote 2 Arroz en secano	Lote 3 Bosque con Cacao
Humedad a -33KPa (%)	Media	31,43	32,31	37,06
	Desviación S.	3,19	4,45	3,04
Humedad al muestreo (%)	Media	27,44	28,39	32,51
	Desviación S.	3,96	6,95	4,86
Temperatura superficie (°C)	Media	26,97	26,74	26,00
	Desviación S.	2,12	2,30	2,25
Da (Tn m ⁻³)	Media	1,53	1,50	1,39
	Desviación S.	0,10	0,09	0,08
Porosidad (%)	Media	40,07	42,64	44,58
	Desviación S.	5,00	4,30	4,72
pH	Media	5,90	6,14	5,59
	Desviación S.	0,54	0,45	0,39
CE (uS cm ⁻¹)	Media	82,80	67,60	72,11
	Desviación S.	60,60	41,40	41,92
CIC (cmol kg ⁻¹)	Media	8,75	9,82	10,55
	Desviación S.	3,12	2,18	2,25

Es importante destacar que, según el análisis de varianza, la densidad aparente del suelo (Da) en cada profundidad evaluada para las tres parcelas, indica que el valor de Da más bajo corresponde al sistema agroforestal de bosque con cacao en las 3 profundidades estudiadas, siendo el suelo de arroz de secano el de mayor Da en la capa superficial del

suelo (0-10 cm), y para el caso de arroz irrigado el mayor valor de D_a en la profundidad de 30-60 cm del suelo (Figura 10).

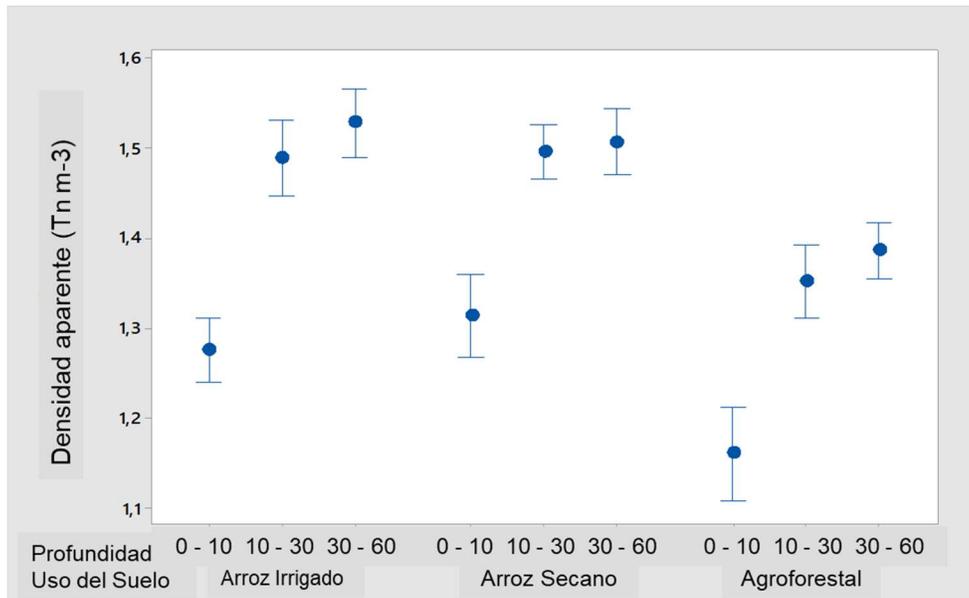


Figura 10. Gráfica de la D_a del suelo en cada profundidad para cada parcela

La densidad aparente durante el ciclo del cultivo, en las etapas 1, 2 y 3, no varió significativamente, con valores medios de 1,38, 1,41, 1,43 Tn m⁻³ respectivamente. En la primera etapa se observó un valor inferior que se asocia al efecto de perturbación del suelo generado por la preparación mecanizada del mismo, posteriormente, el incremento significativo en las siguientes etapas obedece al uso de la maquinaria pesada de manera intensiva y muchas veces en condiciones incorrectas como lo es durante fanguero del suelo. En la etapa 5 se encontró la D_a más baja, 1,32 Tn m⁻³, es decir hay un incremento de la porosidad debido a que en esa etapa el sistema radicular está desarrollado, el suministro de agua por parte del agricultor se interrumpe para el fácil acceso de maquinaria al cultivo, manteniéndose el suelo húmedo debido a las lluvias.



Es importante señalar que, para suelos de clase textural fina como el caso que nos ocupa, la D_a debe ser inferior a $1,25 \text{ Tn m}^{-3}$. Lo cual indica que, en todos los casos, estos suelos están presentando una elevada D_a , y como consecuencia de ello la porosidad disminuye, el intercambio gaseoso suelo-atmósfera o fase gaseosa se interrumpe y la dificultad de las raíces de las plantas en penetrar el suelo es mayor.

Respecto a la densidad aparente en función de la profundidad, se aprecia que de 0-10 cm se presentó el valor más bajo $1,25 \text{ Tn m}^{-3}$, a pesar de la constante compactación y anegación, la influencia ejercida por el sistema radicular sobre el suelo generó un suelo menos compactado, pero el uso constante de la maquinaria y el peso de la lámina de agua compactan el subsuelo aumentando la densidad a $1,43 \text{ Tn m}^{-3}$ en 10–30 cm y $1,47 \text{ Tn m}^{-3}$ en 30 – 60 cm, el efecto del desarrollo de la compactación de los horizontes, producen un suelo menos permeable, es limitado el crecimiento del sistema radicular y baja la aireación del suelo.

Las densidades aparentes según su uso, son similares en las dos parcelas de arroz, con valores de $1,44$ y $1,45 \text{ Tn m}^{-3}$ respectivamente, evidenciando que en el cultivo de arroz en ambos usos la porosidad total, la aireación y la permeabilidad es baja. Estas condiciones limitan el desarrollo de las raíces de las plantas, causado por las actividades del uso de maquinaria pesada que compactan el suelo y también al peso de la lámina de agua que con el tiempo afecta la aireación, contrario a lo encontrado en el sistema agroforestal, donde la densidad aparente fue de $1,26 \text{ Tn m}^{-3}$ lo cual es influenciado por el contenido de materia orgánica la cual pesa menos que el material mineral y mejora la estabilidad de los agregados y como consecuencia se tiene una mayor porosidad del suelo, mejor permeabilidad, buena aireación del suelo y el desarrollo de las raíces de las plantas no se ve limitado por la compactación del subsuelo.

5.2 Evaluación de carbono soluble

Se evaluó el contenido de Carbono Orgánico (CO) presente en el agua de riego a la entrada y salida del cultivo de arroz (Tabla 12). Cabe aclarar que algunas muestras no se obtuvieron, debido a que no había presencia de agua en la entrada o salida del cultivo de arroz en donde se encuentran las áreas de los sistemas de arroz irrigado y arroz de secano.

Tabla 12. Porcentaje de COT en el agua de riego a la entrada y salida del cultivo de arroz

COT en el Agua			
Etapa	lugar	ppm COT	% COT
1	Entrada	0,5407	0,00005407
	Salida	1,9993	0,00019993
2	Entrada	2,0264	0,00020264
	Salida	1,3928	0,00013928
3	Entrada	0,822	0,0000822
	Salida	2,7423	0,00027423
4	Entrada	N/A	N/A
	Salida	N/A	N/A
5	Entrada	0,8017	0,00008017
	Salida	1,3041	0,00013041
6	Entrada	0,5054	0,00005054
	Salida	N/A	N/A
7	Entrada	1,2125	0,00012125
	Salida	0,6323	0,00006323
8	Entrada	3,9161	0,00039161
	Salida	N/A	N/A
9	Entrada	N/A	N/A
	Salida	N/A	N/A
10	Entrada	0,7649	0,00007649
	Salida	N/A	N/A

Los valores encontrados de COT en el agua de riego fueron despreciables, estando algunos de ellos por debajo de límite de detección del equipo. Por lo tanto, no hay un aporte



o disminución significativa del % CO en el suelo por parte de agua de riego. El carbono orgánico total (TOC) en el agua es la cantidad total de carbono unidos a compuestos orgánicos, por lo tanto, el agua para el riego de los cultivos proviene del Rio Zulia, el cual puede tener concentraciones de carbono total moderadas, pero debido a que el distrito de riego posee canales que conectan los cultivos de arroz, y el procedimiento para llevar el agua hasta su destino es por efecto de la gravedad, provoca un proceso de oxigenación en donde se degrada la MO y disminuye su concentración, para posteriormente entrar al cultivo de arroz.

También se realizó la medición de carbonatos y bicarbonatos en el agua del suelo, cuyo valor fue de cero.

5.3 Evaluación del carbono orgánico estable del suelo

Los resultados de carbono orgánico estable del suelo (COS) durante diez meses continuos en las tres parcelas estudiadas mostraron un efecto estadísticamente significativo para los factores tipo de uso del suelo, profundidad del suelo y etapa del cultivo, mientras que el factor ciclo del cultivo no tuvo un efecto estadístico significativo sobre este parámetro del suelo.

Para el COS (Tabla 13) se encontró que el bosque con cacao tiene un contenido significativamente mayor al del suelo bajo cultivo de arroz, tanto con riego como sin riego. Lo cual es plenamente congruente con las características de cada tipo de uso, y la forma como los mismos afectan el suelo.

Para el caso del contenido de carbono por cada tipo de uso de suelo, se encontró que el arroz irrigado tiene menos COS que el arroz de secano. Es importante resaltar que el sistema de arroz de secano presenta los menores contenidos de COS y el sistema agroforestal de bosque con cacao es el que presenta el mayor contenido de COS.



Tabla 13. Tabla de medias para COS con intervalos de confianza del 95%

Nivel	Casos	Media
MEDIA GLOBAL	270	2,32
Tipo de Uso		
Arroz Irrigado	90	2,31 ab
Arroz Secano	90	2,15 a
Agroforestal (Bosque con cacao)	90	2,48 b
Ciclo de Cultivo		
Ciclo 1	135	2,35 a
Ciclo 2	135	2,29 a
Profundidad		
Profundidad 1	90	2,99 c
Profundidad 2	90	2,16 b
Profundidad 3	90	1,81 a
Etapas del Cultivo		
Etapas 1	54	2,48 b
Etapas 2	54	2,42 b
Etapas 3	54	2,15 a
Etapas 4	54	2,49 b
Etapas 5	54	2,06 a

El análisis estadístico (ANOVA) para el contenido de carbono orgánico en el suelo muestra que hay efecto significativo de los factores: uso del suelo, etapa del cultivo y profundidad del suelo. También se encontró que solo la interacción entre ciclo y la etapa del cultivo tienen efecto significativo (Tabla 14).

Tabla 14. Análisis de varianza para COS - suma de cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Uso del Suelo	4,79241	2	2,3962	7,34	0,0009
B: Ciclo de Cultivo	0,302673	1	0,302673	0,93	0,3369
C: Profundidad del suelo	66,1822	2	33,0911	101,38	0,0000
D: Etapas del Cultivo	8,66404	4	2,16601	6,64	0,0001
INTERACCIONES					



AB	0,853205	2	0,426603	1,31	0,2732
AC	2,93712	4	0,734281	2,25	0,0655
AD	4,39645	8	0,549556	1,68	0,1050
BC	0,585854	2	0,292927	0,90	0,4094
BD	3,18083	4	0,795207	2,44	0,0489
CD	3,96702	8	0,495878	1,52	0,1532
ABC	0,513228	4	0,128307	0,39	0,8134
ABD	3,04262	8	0,380327	1,17	0,3226
ACD	4,26783	16	0,26674	0,82	0,6649
BCD	1,51647	8	0,189559	0,58	0,7929
ABCD	3,58796	16	0,224248	0,69	0,8045
RESIDUOS	58,751	180	0,326394		
TOTAL (CORREGIDO)	167,541	269			

En términos de contenido de COS, expresado en proporción con base al peso del suelo, se encuentra una mejor condición en el sistema de uso agroforestal ya que presentó un mayor porcentaje de carbono orgánico (Figura 11).

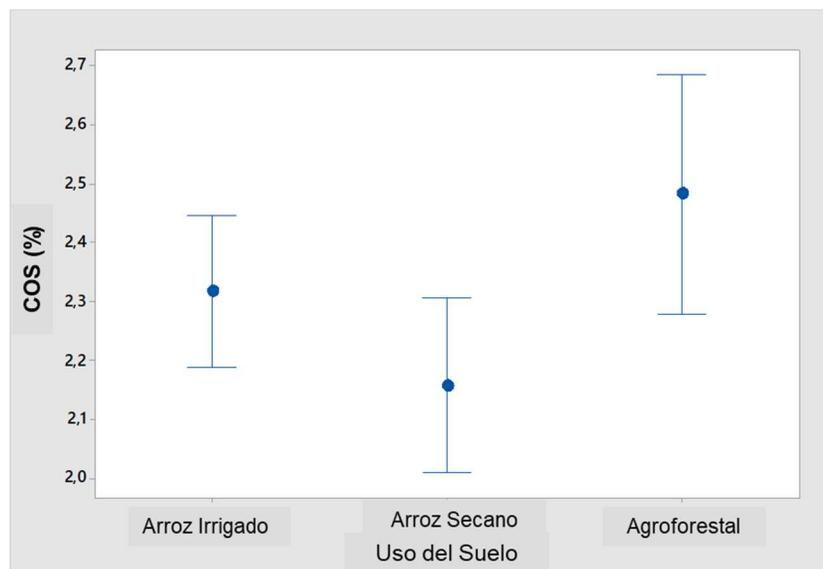


Figura 11. Gráfica del contenido de COS por cada tipo de uso del suelo

En cuanto al contenido de COS con respecto a la profundidad del suelo, el mayor contenido de COS se encuentra en la capa superficial del suelo, de 0 a 10 cm de profundidad (Figura 12), observándose una disminución con la profundidad, que expresa la estratificación del contenido de COS en el perfil.

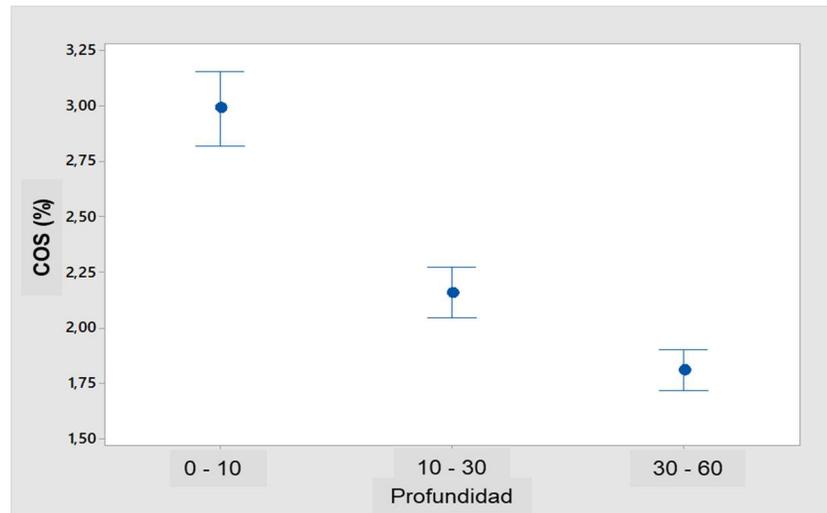


Figura 12. Gráfica del contenido de COS para cada profundidad de suelo

Al observar el efecto de la etapa del cultivo sobre el COS (Figura 13), se encontró que el valor más alto de COS se evidencia en la etapa 4 (2,49%) seguido de la etapa 1 (2,48%). Mientras que los dos valores más bajos corresponden a la etapa 5 (2,06%) seguido de la etapa 3 (2,15%).

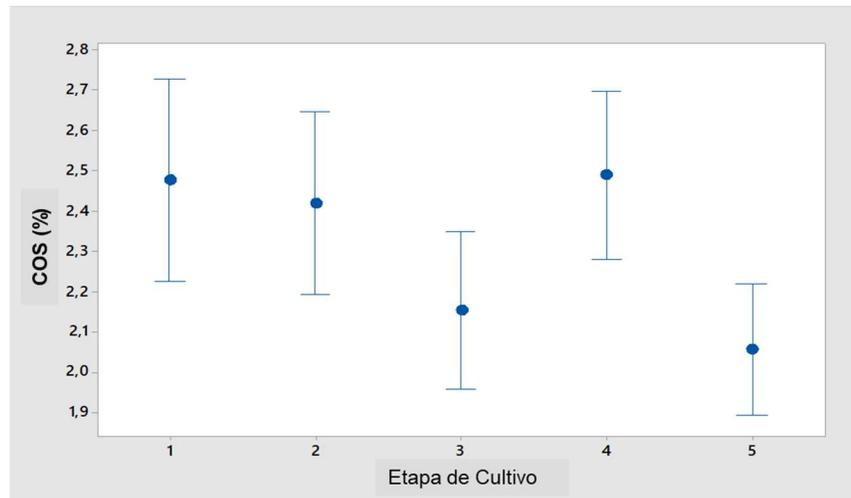


Figura 13. Gráfica del contenido de COS para cada etapa del cultivo.

El análisis estadístico no reveló efecto significativo de la interacción del sistema de uso del suelo con la etapa de muestreo sobre el carbono orgánico estable del suelo (COS) (Tabla 15). Sin embargo, es importante remarcar que el suelo del bosque con cacao mostró

mayores contenidos de COS que las parcelas de arroz desde la etapa 2 hasta la etapa 5. En las parcelas de arroz la tendencia observada es un descenso del contenido de COS con el avance en las etapas, mientras que en la parcela de bosque con cacao la tendencia es que el COS va incrementando con el avance de las etapas.

Tabla 15. Tabla de medias para el COS en la interacción del uso del suelo con la etapa del cultivo.

Uso del Suelo vs. Etapa de Cultivo	Casos	Media
Arroz Irrigado, Etapa 1	18	2,37
Arroz Irrigado, Etapa 2	18	2,56
Arroz Irrigado, Etapa 3	18	2,25
Arroz Irrigado, Etapa 4	18	2,35
Arroz Irrigado, Etapa 5	18	2,06
Arroz Secano, Etapa 1	18	2,45
Arroz Secano, Etapa 2	18	2,17
Arroz Secano, Etapa 3	18	1,98
Arroz Secano, Etapa 4	18	2,17
Arroz Secano, Etapa 5	18	2,02
Agroforestal, Etapa 1	18	2,61
Agroforestal, Etapa 2	18	2,53
Agroforestal, Etapa 3	18	2,23
Agroforestal, Etapa 4	18	2,95
Agroforestal, Etapa 5	18	2,09

En el estudio del COS es importante calcular la capacidad de almacenamiento que tiene el suelo, para lo cual se debe tener presente la Da y la profundidad de cada horizonte para así expresar el almacenamiento en kg de COS por hectárea. En este sentido, se utilizan los valores del contenido de COS en cada parcela y en cada profundidad (Figura 14), así como la Da y la profundidad de cada horizonte en cada suelo.

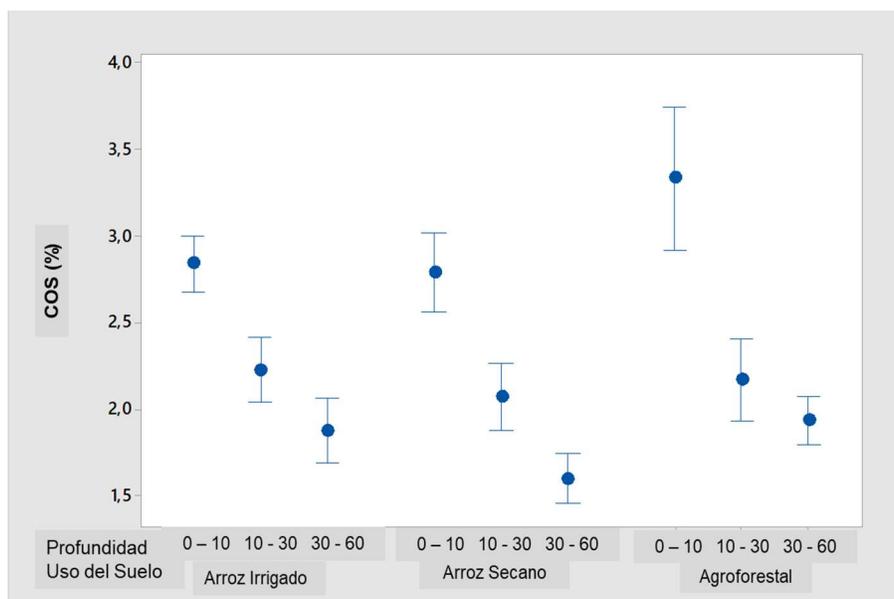


Figura 14. Gráfica del contenido de COS en cada parcela y para cada profundidad

Cuando se observa el comportamiento del almacenamiento de carbono orgánico (CO) en el suelo para cada sistema de cultivo en el perfil de suelo (Tabla 16), se aprecia que el almacenamiento de CO en términos de proporción es mayor en el sistema arroz irrigado ($188800 \text{ kg COS ha}^{-1}$), seguido de arroz de secano ($163836 \text{ kg COS ha}^{-1}$) y menor cantidad el sistema agroforestal de bosque con cacao ($161296 \text{ kg COS ha}^{-1}$).

Tabla 16. Cálculo del almacenamiento de CO en el perfil de suelo

Parcela	Profundidad	COS (%)	Da (Tn/m^3)	kg COS ha^{-1}	kg COS ha^{-1}
1 (Arroz Irrigado)	0 a 10 cm	2,84	1,28	36352	188800
	10 a 30 cm	2,22	1,49	66156	
	30 a 60 cm	1,88	1,53	86292	
2 (Arroz Secano)	0 a 10 cm	2,23	1,32	29436	163836
	10 a 30 cm	2,08	1,50	62400	
	30 a 60 cm	1,60	1,50	72000	
3 (Bosque con cacao)	0 a 10 cm	1,88	1,16	21808	161296
	10 a 30 cm	2,17	1,35	58590	
	30 a 60 cm	1,94	1,39	80898	

5.4 Evaluación del carbono de la biomasa microbiana

El análisis de varianza para el carbono orgánico de la biomasa microbiana (BM) indicó que solo el factor etapa de muestreo tiene un efecto estadísticamente significativo en esta variable. El sistema de uso del suelo y el ciclo de cultivo tuvieron una interacción significativa con la etapa sobre BM (Tabla 17).

Tabla 17. Tabla de medias para carbono de la biomasa microbiana con intervalos de confianza del 95%.

Nivel	Casos	Media
Media global	90	1,80
Uso del Suelo		
Arroz irrigado	30	1,80 a
Arroz de secano	30	1,68 a
Agroforestal	30	1,91 a
Ciclo de Cultivo		
Ciclo 1	45	1,87 a
Ciclo 2	45	1,73 a
Etapa de Cultivo		
Etapa 1	18	1,60 b
Etapa 2	18	1,21 a
Etapa 3	18	1,53 ab
Etapa 4	18	2,36 c
Etapa 5	18	2,29 c

Aunque no hay diferencia estadística, se observó que el suelo del bosque con cacao presentó el mayor carbono orgánico de la biomasa microbiana (BM), seguido del arroz

irrigado, por lo que el suelo con arroz de secano presentó el menor contenido en carbono de la BM (Tabla 18).

Tabla 18. Carbono orgánico del suelo (COS), carbono orgánico (CO) de la biomasa microbiana y carbono de la necromasa en el suelo superficial con comparaciones de LSD en intervalos de confianza del 95%.

Fuente de C	COS (%)	CO de BM (mg 100g ⁻¹)	C de Necromasa (g m ⁻²)
Uso del Suelo (n=30)			
Arroz Irrigado	2.84(0.35) a	1.80(0.62) a	62.64(151.1)
Arroz secano	2.89(0.46) a	1.68(0.67) a	57.49(124.7)
Agroforestal	3.22(0.56) b	1.91(0.85) a	781.82(424.7)
Ciclo del Cultivo (n=45)			
Ciclo 1	3.01(0.47) a	1.87(0.82) a	304.05(375.9)
Ciclo 2	2.96(0.51) a	1.73(0.60) a	297.25(489.5)
Etapa de Cultivo (n=18)			
Etapa 1	3.02(0.47) a	1.60(0.49) b	491.33(727)
Etapa 2	3.12(0.32) a	1.21(0.65) a	346.37(463)
Etapa 3	2.88(0.55) a	1.53(0.46) ab	201.87(287.2)
Etapa 4	3.06(0.72) a	2.36(0.61) c	168.10(236.1)
Etapa 5	2.83(0.20) a	2.29(0.62) c	295.57(187.3)

Desviación estándar. Letras diferentes indican medias con diferencias estadísticas significativas.

Debido a la interacción de factores como el uso del suelo y la etapa de muestreo (Figura 15) el CO de la BM se comporta de manera similar en los usos de bosque con cacao y arroz riego, donde hay una disminución de la etapa 1 a la etapa 2 para luego aumentar, lo cual se observa en el bosque con cacao con mayor OC de BM.

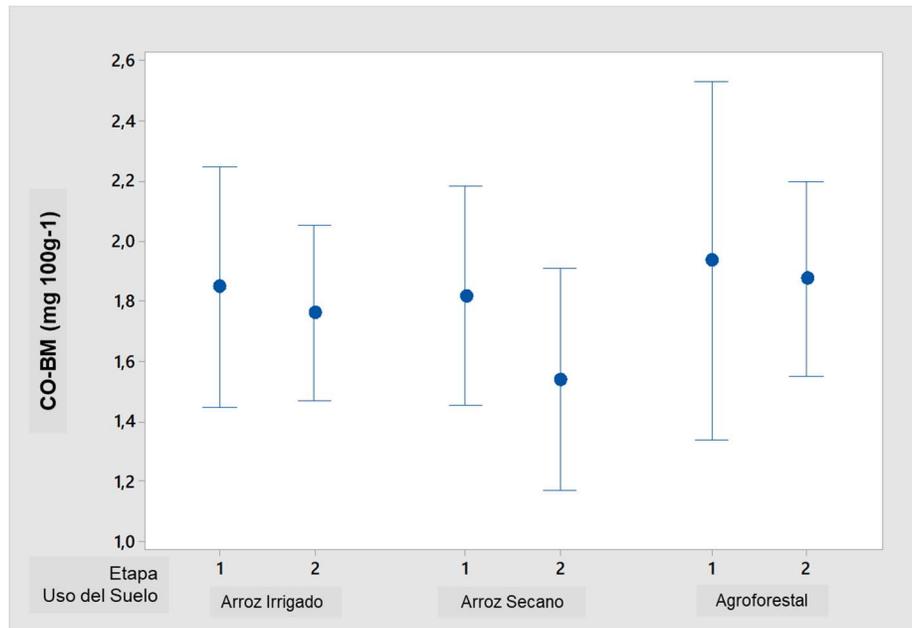


Figura 16. Efecto de interacción del ciclo y la etapa sobre el carbono orgánico (CO) de la biomasa microbiana (BM) (n = 15).

5.5 Evaluación del carbono en la necromasa sobre el suelo

Las mediciones del carbono en la necromasa sobre el suelo en las parcelas de estudio no cumplieron con los supuestos de normalidad y de homogeneidad de la varianza, lo cual requirió un análisis no paramétrico (Tabla 19).



Tabla 19. Tabla de Medias para carbono de la necromasa para los factores evaluados.

	Casos	Media
Media global	90	300,65
Uso del Suelo		
Arroz irrigado	30	62,64
Arroz de secano	30	57,49
Agroforestal (Bosque con cacao)	30	781,82
Ciclo de Cultivo		
Ciclo 1	45	304,05
Ciclo 2	45	297,25
Etapas del Cultivo		
Etapas 1	18	491,33
Etapas 2	18	346,37
Etapas 3	18	201,87
Etapas 4	18	168,10
Etapas 5	18	295,57

Las concentraciones de carbono en la necromasa sobre el suelo (Tabla 19) indicaron que el factor de uso de la tierra tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el carbono de la necromasa, siendo el uso agroforestal de bosque con cacao el que presenta el mayor carbono de la necromasa (Figura 17 y 18).

En el caso del efecto del factor de la etapa de muestreo sobre el carbono de la necromasa, el análisis no paramétrico de las medianas reveló que la etapa 1 es la de mayor cantidad de carbono en la necromasa mientras que en la etapa 4 se observó la menor cantidad de carbono en la necromasa (Figura 17).

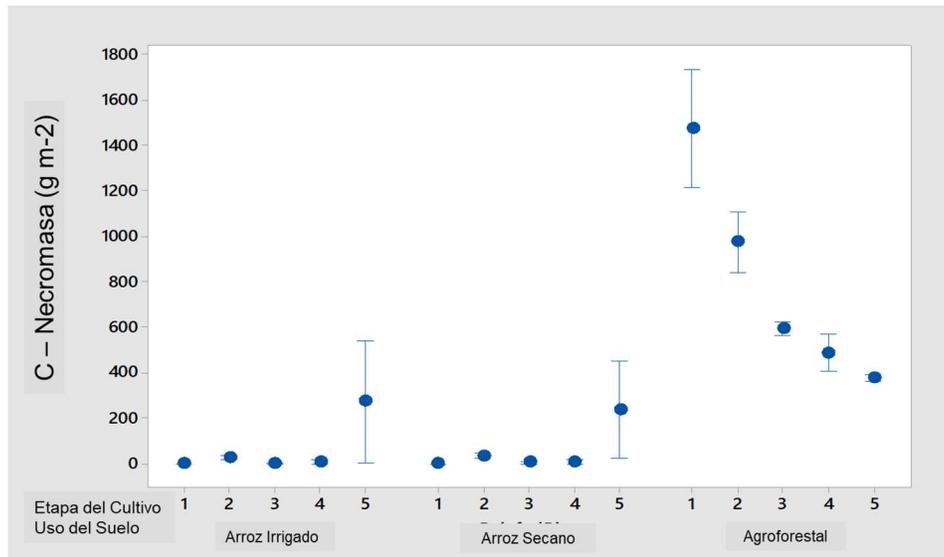


Figura 17. Efecto del uso del suelo y etapa sobre el carbono de la necromasa (n = 6).

Mediante el análisis no paramétrico de las medianas Kruskal - Wallis, se observó que el factor uso del suelo sobre el carbono de la necromasa tiene un efecto estadísticamente significativo, siendo el uso de bosque con cacao el que tiene mayor carbono de la necromasa (Figura 18).

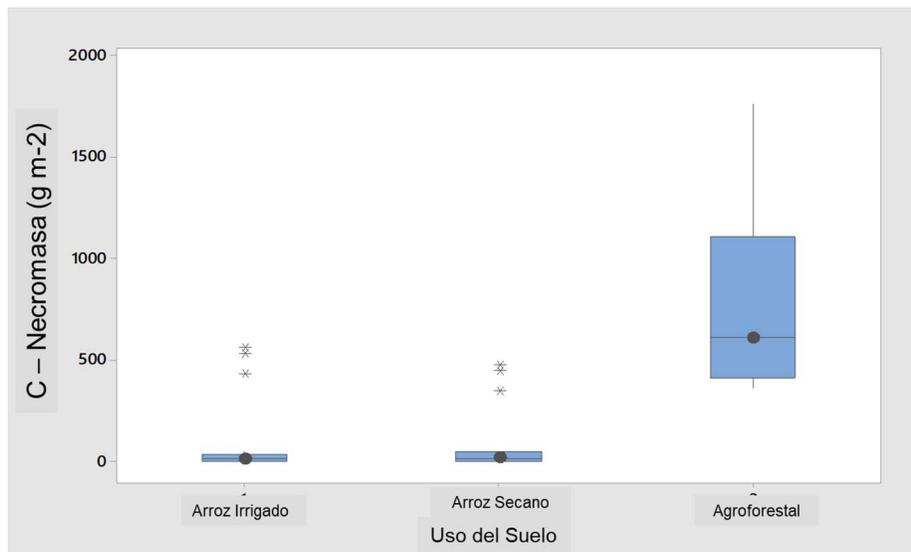


Figura 18. Efecto del factor Uso del suelo sobre el Carbono de la necromasa.



En el caso del efecto del factor etapa de muestreo sobre el carbono de la necromasa el análisis no paramétrico de las medianas permitió conocer que la etapa 1 es la de menos carbono de la necromasa y la etapa 5 es la de mayor cantidad de Carbono de la necromasa (Figura 19).

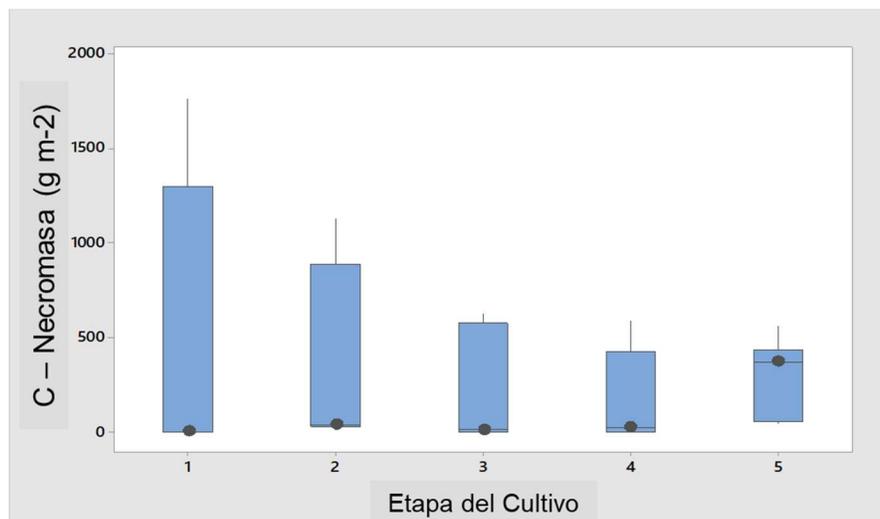


Figura 19. Efecto del factor etapa de muestreo sobre el carbono de la necromasa.

5.6 Evaluación de las emisiones de carbono a la atmósfera

El flujo expresa la cantidad del gas emitido por unidad de área y de tiempo ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) y es una magnitud que permite analizar la producción de los gases en las parcelas de estudio. El análisis estadístico de los datos recolectados mostró un comportamiento diferente entre los gases CO_2 y CH_4 según el sistema de uso del suelo. Se observó un comportamiento estadísticamente diferente entre el bosque con cacao y las dos parcelas de arroz. Indicando que las dos parcelas de arroz tuvieron mayores emisiones de CO_2 y CH_4 en comparación con el sistema agroforestal de bosque con cacao (Tabla 20).



Tabla 20. Comparaciones no paramétricas de medianas (Kruskal-Wallis) de emisiones de CO₂ y CH₄ por tipo de uso del suelo.

Uso del suelo	n	Flujo CO ₂ mg m ⁻² h ⁻¹	Flujo CH ₄ mg m ⁻² h ⁻¹
Arroz irrigado	30	325, 79a	0, 15a
Arroz de secano	30	383, 45a	0, 14a
Agroforestal (Bosque con cacao)	30	125, 33b	0,02b

El flujo de CO₂ fue un 61,5% más alto en el arroz irrigado y un 67,3% más alto en el campo de arroz de secano en comparación con el flujo de CO₂ en el sistema agroforestal de bosque con cacao. Además, la evidencia mostró que el arroz de secano produce emisiones ligeramente más altas que en el arroz irrigado. Por su parte, para el flujo de CH₄ se encontró que el sistema agroforestal de bosque con cacao presentó emisiones significativamente más bajas que en las parcelas de arroz, siendo el 13,3% y 14,3% superiores las emisiones generadas en arroz irrigado y arroz de secano, respectivamente comparadas con el sistema agroforestal. Además, el arroz irrigado produce emisiones de CH₄ ligeramente superiores a las del arroz de secano.

En el primer muestreo (Figura 20), correspondiente a la etapa inicial del cultivo cuando está recién preparado el suelo para la siembra, las mediciones de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), muestran una importante producción de los tres gases medidos en las parcelas con arroz irrigado y arroz de secano. Siendo el CO₂ el gas con mayores emisiones, seguido del N₂O y con menor emisión el CH₄.

Para el caso de la parcela agroforestal de bosque con cacao se observa que el suelo se comporta como sumidero de metano, lo cual evidencia una valiosa característica del servicio ambiental que presta el suelo del bosque con cacao. Con respecto al CO₂ y el N₂O

el suelo se comporta en este muestreo como emisor, aunque en mucha menor cantidad que las parcelas con arroz.

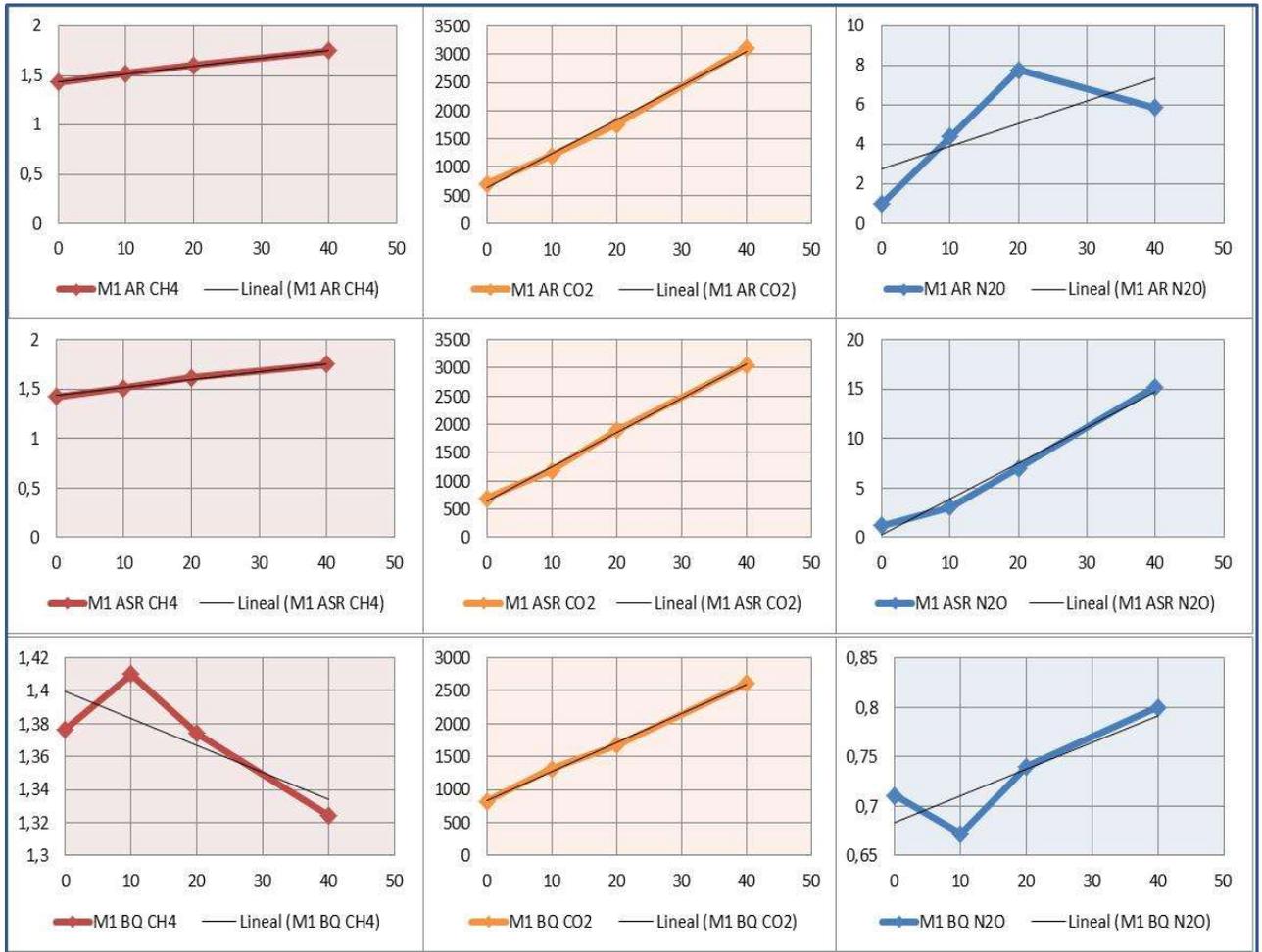


Figura 20. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH₄, CO₂ y N₂O) en el primer muestreo (M1).

En el segundo muestreo, las curvas de medición de los gases de efecto invernadero (GEI) en cada suelo estudiado (Figura 21), muestran que el suelo se comporta como fuente de CO₂ y N₂O en todos los tipos de uso de suelo evaluados. Pero en el caso del CH₄ el suelo de bosque con cacao y de arroz de secano, se comporta como sumidero.

También es notable que las magnitudes de emisión del suelo para los gases CO_2 y N_2O en los suelos con arroz es menor a las registradas en el primer muestreo, lo cual coincide con una mayor emisión de CO_2 en el suelo recientemente mecanizado.

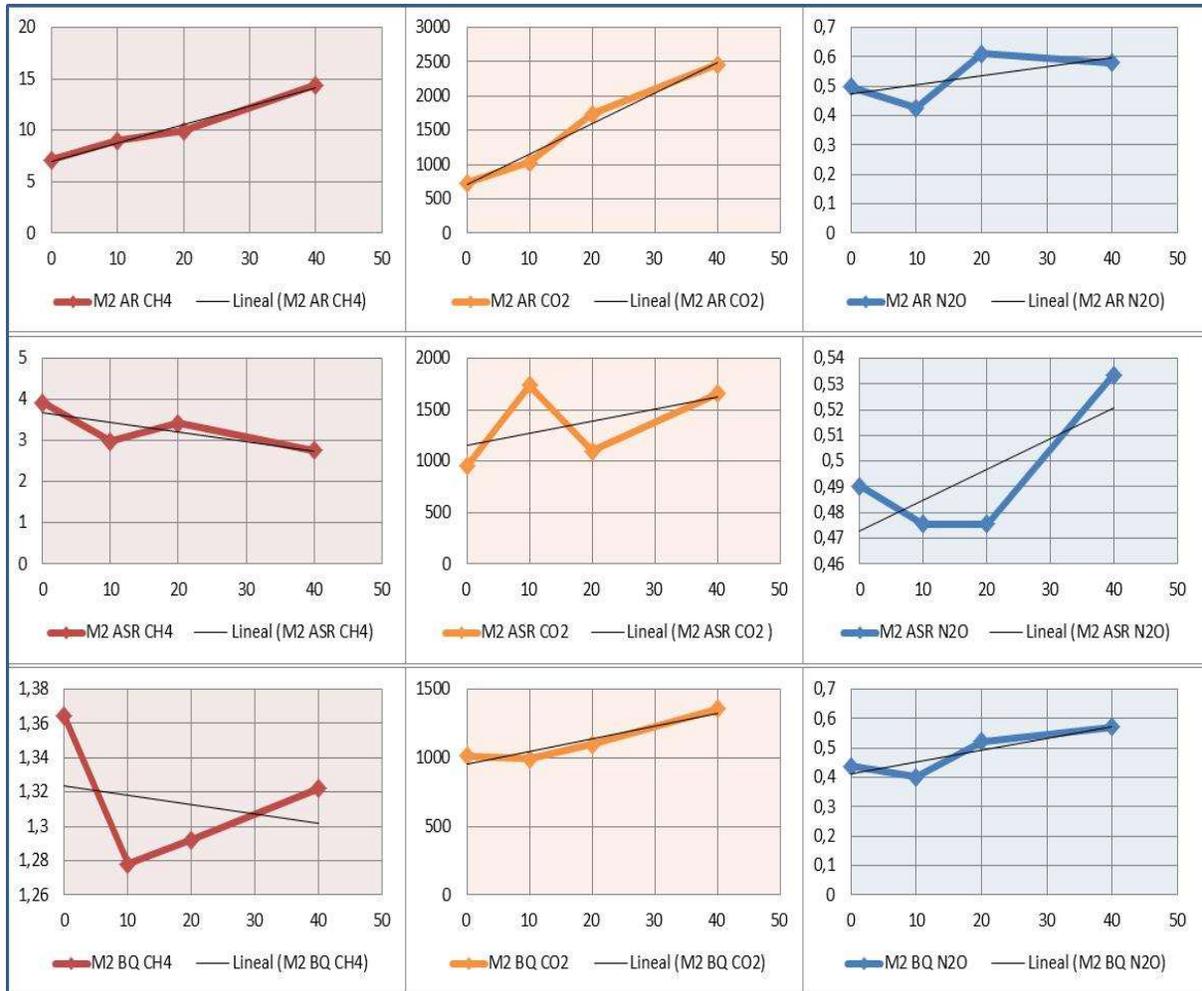


Figura 21. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH_4 , CO_2 y N_2O) en el segundo muestreo (M2).

Para el tercer muestreo se observaron las mayores emisiones de los tres GEI en la parcela de arroz de secano (Figura 22).

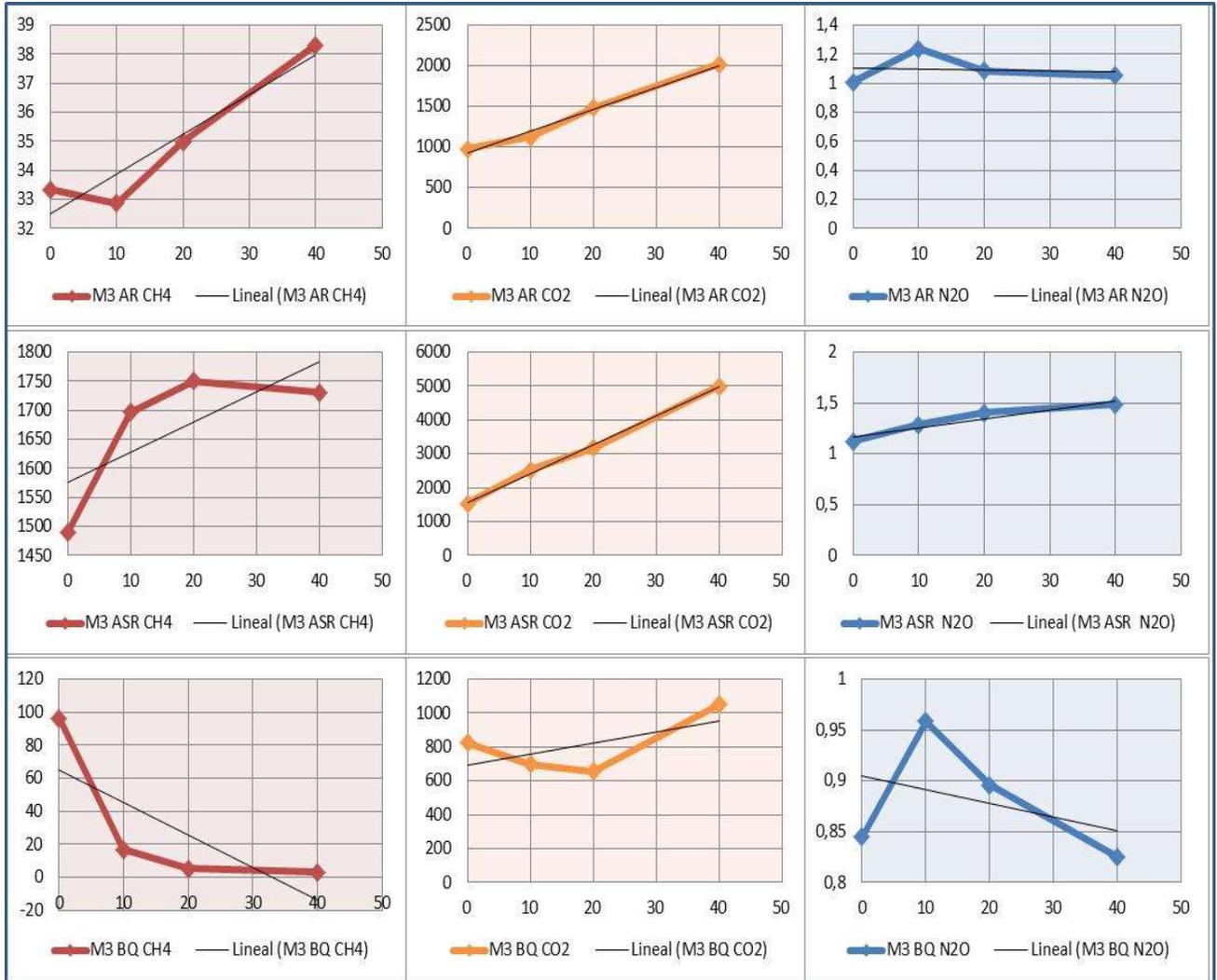


Figura 22. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH₄, CO₂ y N₂O) en el tercer muestreo (M3).

El cuarto muestreo corresponde a la etapa de espigado o floración del arroz y al momento de menor humedad en el suelo debido a restricciones en el riego y al periodo de sequía (Figura 23). En este caso el suelo se comportó como emisor de los tres GEI en todos los tipos de uso del suelo.

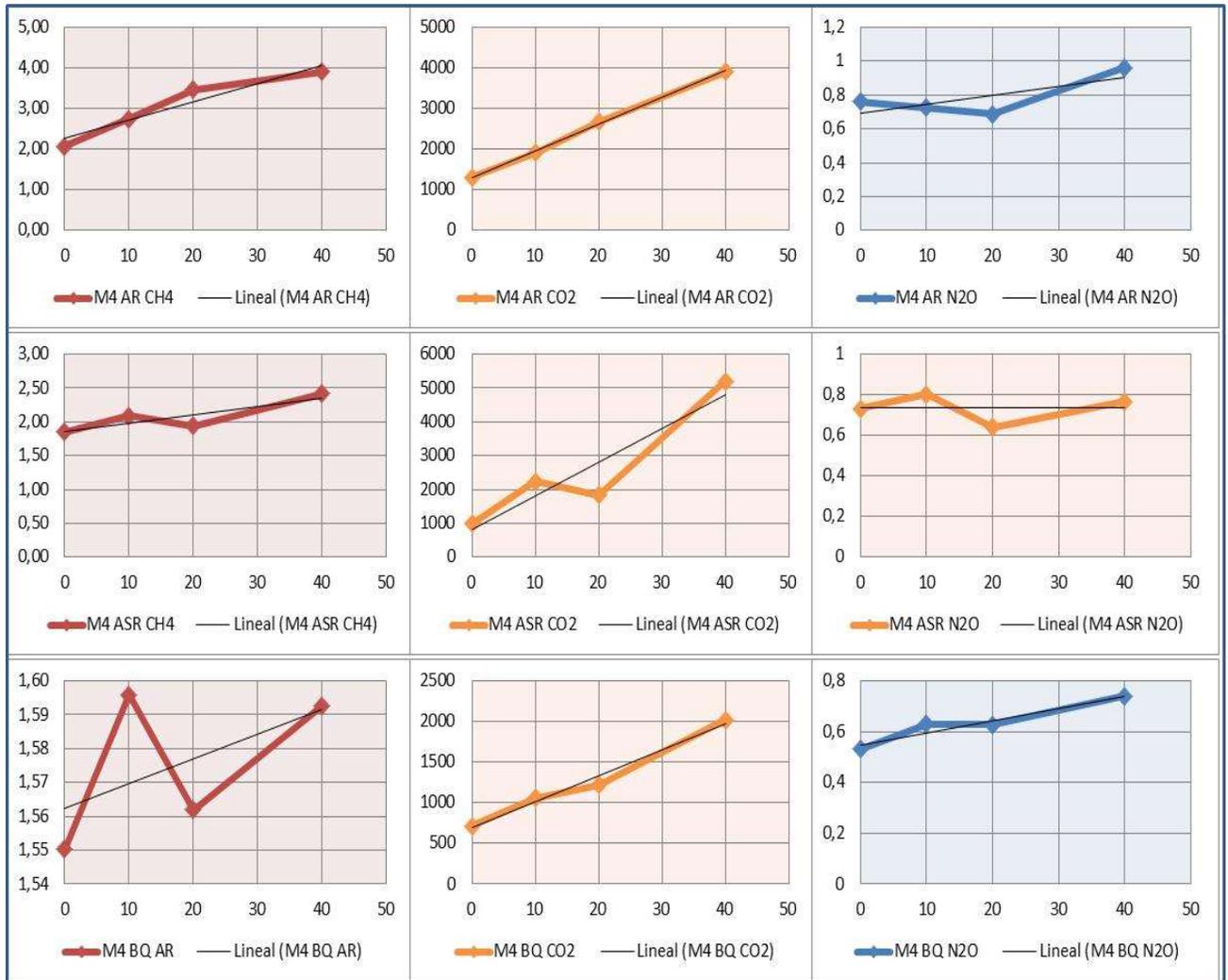


Figura 23. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH₄, CO₂ y N₂O) en el cuarto muestreo (M4).

En el último muestreo que corresponde a la etapa final del cultivo (Figura 24), donde el arroz ha sido cortado para la cosecha, se encontró que la parcela de arroz irrigado continúa siendo una fuente importante de los tres GEI.

Por otro lado, en la parcela de arroz de secano, el suelo es fuente de emisión de CO₂, pero se mostró nuevamente como sumidero de CH₄. En el caso del N₂O, la curva de emisión tiene una pendiente de cero, lo cual evidencia la no emisión y la no captura de este gas en este muestreo en la parcela de arroz de secano.

Para el caso del suelo de la parcela del bosque con cacao, se observó que hay emisión del CO_2 y del N_2O , pero para el gas CH_4 , el suelo se comporta nuevamente como sumidero.

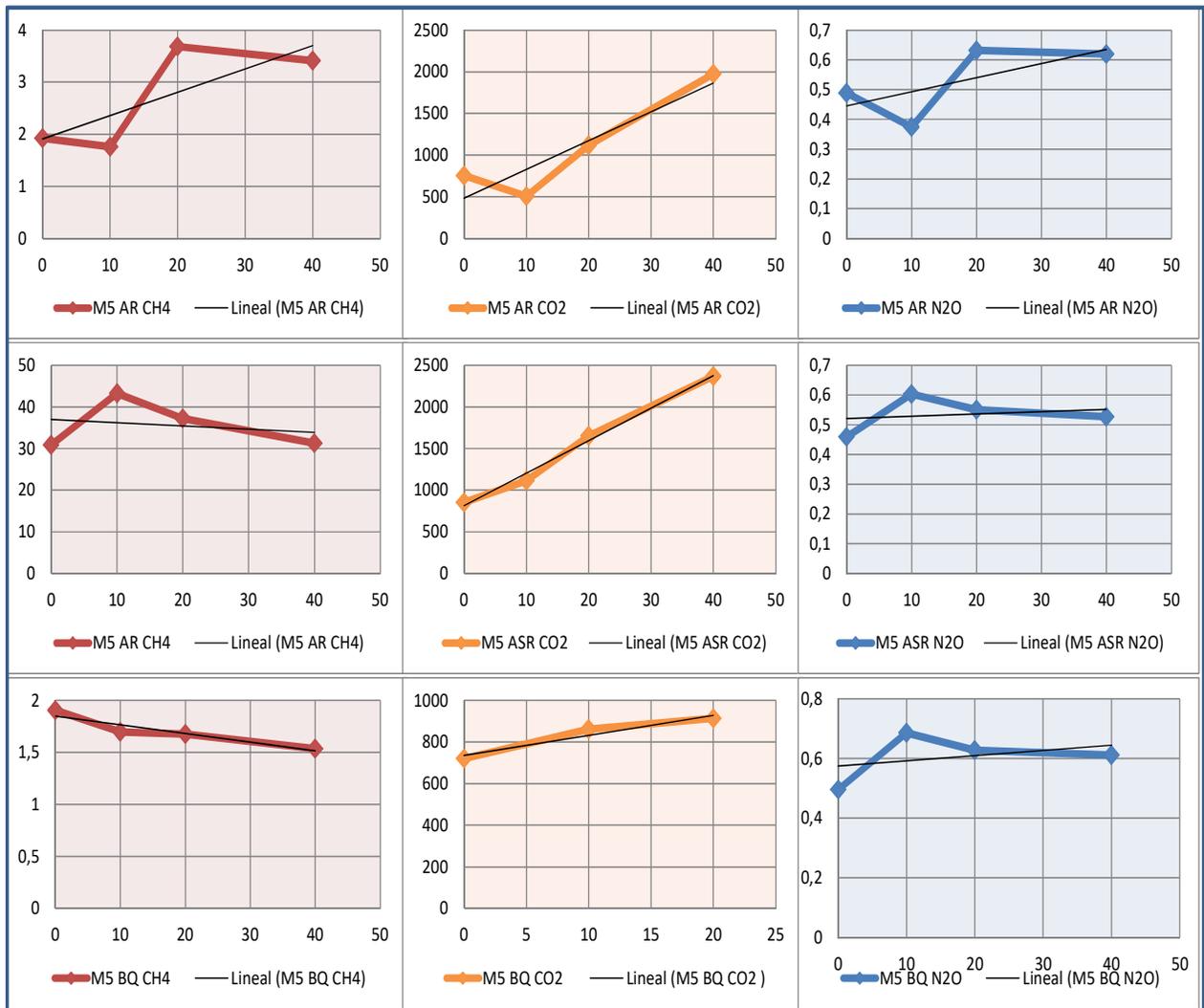


Figura 24. Comportamiento de la emisión de gases de efecto invernadero (CH_4 , CO_2 y N_2O) en el quinto muestreo (M5).

5.6.1 Flujos de los gases de efecto invernadero (CH_4 , CO_2 y N_2O) según la etapa de cultivo y el uso del suelo.

El análisis estadístico de los datos recolectados muestra un comportamiento diferenciado entre los tres gases (CH_4 , CO_2 y N_2O) según la etapa del cultivo y el uso del suelo. Además, se encontró que los resultados no cumplen con los supuestos estadísticos para el análisis de varianza, por lo cual se realizaron análisis no paramétricos mediante la prueba de Kruskal & Wallis (Tabla 21).

Tabla 21. Resumen de estadísticos para el Flujo de los GEI en el experimento de campo

	Flujo CH_4 ($mg\ m^{-2}h^{-1}$)	Flujo CO_2 ($mg\ m^{-2}h^{-1}$)	Flujo N_2O ($mg\ m^{-2}h^{-1}$)
Media	1,646	578,863	0,337
Varianza	190,482	$4,01 \times 10^6$	0,819
Desviación Típica	13,802	2002,38	0,905
Mínimo	-41,74	-110,218	-0,063
Máximo	73,41	13641,7	3,831

5.6.2 Flujos de los GEI según la etapa de cultivo

El flujo de los gases CO_2 y N_2O está afectando significativamente por el factor etapa del cultivo, mientras que para el flujo de CH_4 no hay efecto significativo (Figura 25 y 26). Para el óxido nitroso la menor emisión fue en la tercera etapa y la mayor emisión fue en la primera etapa, mientras que para el dióxido de carbono la menor emisión fue en la segunda etapa y la mayor emisión se registró en la cuarta etapa.

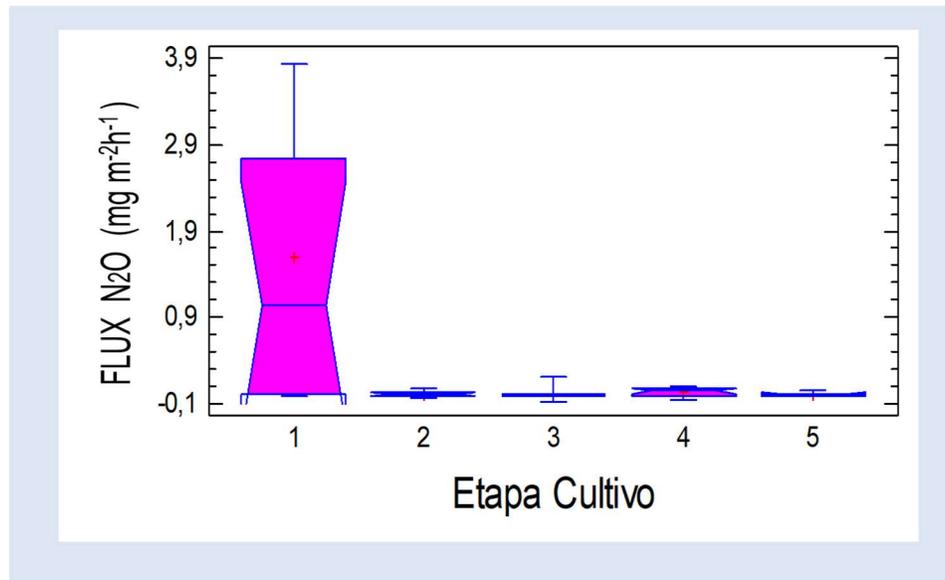


Figura 25. Flujo del óxido nitroso (N₂O) según la etapa de cultivo.

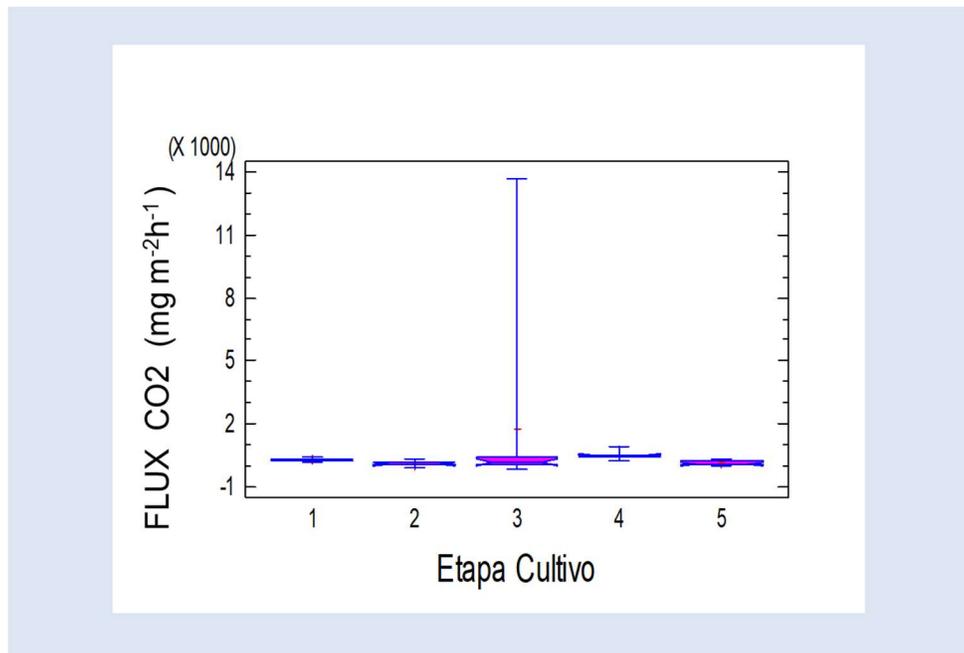


Figura 26. Flujo del dióxido de carbono (CO₂) según la etapa de cultivo.

5.6.3 Flujo de los GEI según el tipo de uso del suelo

Para el flujo de CH₄ existe un efecto estadísticamente significativo del factor tipo de uso del suelo, siendo el arroz irrigado el uso que muestra el mayor flujo de CH₄ y el bosque con cacao el uso con el menor flujo de CH₄ (Figura 27). Por otro lado, el análisis no paramétrico mostró que no existe efecto significativo del tipo de uso del suelo para el flujo de dióxido de carbono y el flujo de óxido nítrico.

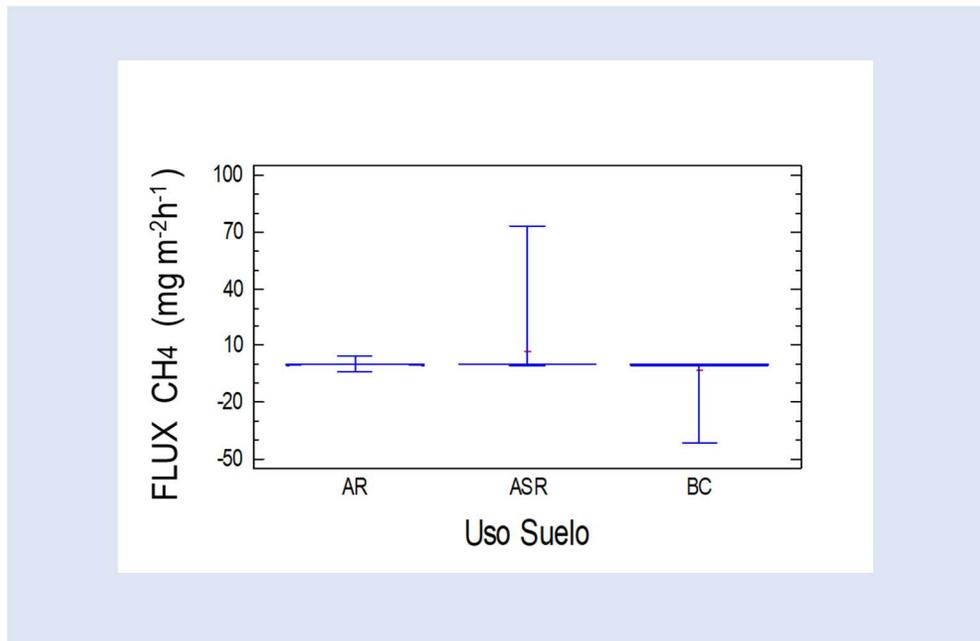


Figura 27. Flujo del metano (CH₄) según el tipo de uso del suelo.

Sin embargo, al observar las gráficas de medias del flujo de CO₂ en función del tipo de uso del suelo, se encontró que a pesar de no existir efecto estadísticamente significativo, se presenta el tipo de uso del bosque con cacao como el uso de menor flujo de CO₂ (Figura 28).

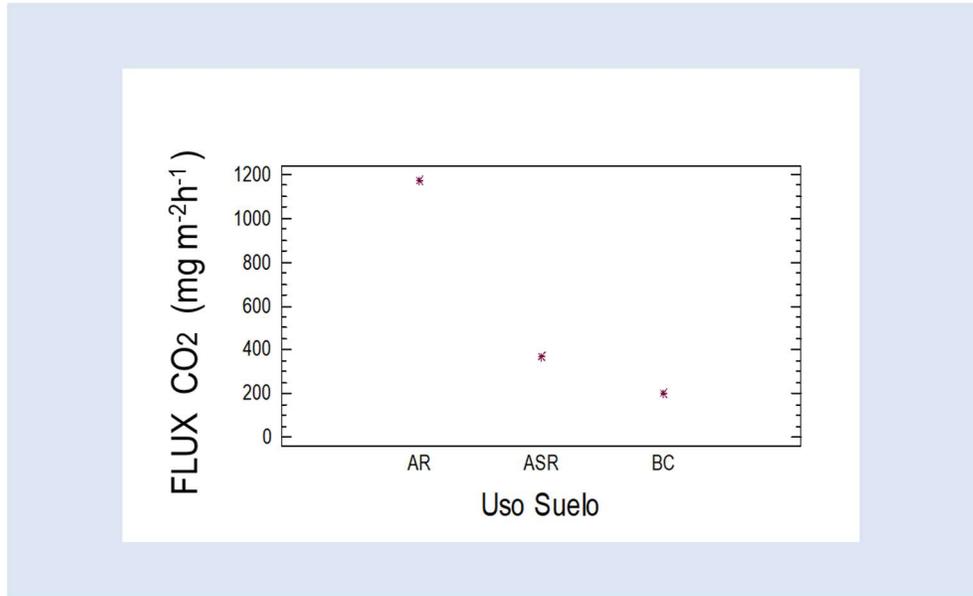


Figura 28. Flujo de dióxido de carbono (CO₂) en función del tipo de uso del suelo.

Situación similar ocurre para el flujo de N₂O en función del tipo de uso del suelo, ya que al observar la gráfica de medias, encontramos que el bosque con cacao es el tipo de uso del suelo con menor flujo de óxido nítrico (Figura 29).

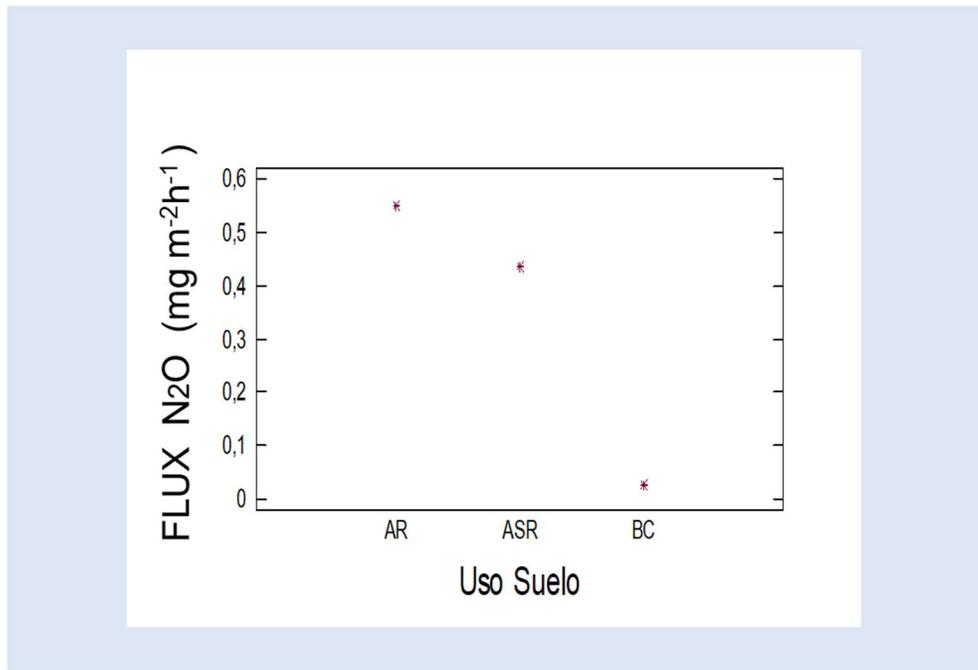


Figura 29. Flujo de óxido nitroso (N₂O) en función del tipo de uso del suelo.

5.7 Evaluación de la calidad de C por RMN ¹³C CP MAS y/o espectro de IR (infrarrojo).

5.7.1 Calidad de C por RMN ¹³C CP MAS

En las figuras 30 a 35 se observan los espectros de RMN ¹³C CP MAS para los suelos evaluados, donde se aprecia una leve presencia de compuestos de carbono en la región de los grupos alquilos, en rangos de 0-50 ppm, y O-alquilos, en rangos de 50-112 ppm, para las muestras de suelos del cultivo de arroz al inicio del ciclo de cultivo, en la que se identifican bandas anchas alquílicas. En general, las muestras presentan bajos contenidos de C, por lo que no se esperaría identificar con claridad muchos grupos funcionales, generalmente suelos no cristalinos, con restos de celulosa y hemicelulosa son suelos que emiten señales anchas.

En la figura 30 el espectro referencia un grupo alquílico, entre 10 y 50 ppm, resaltando 35-45 ppm de carbono del grupo funcional: complejo de alifáticos: CH₂, CH, C y en 20

ppm de carbono del grupo funcional: Metil: CH_3 . Se observa en la zona 50-70 ppm C unido a un O, carbono del grupo funcional metoxi, metino y carbono cuaternario: CH_3O -, CH-NH , CH , C . En la zona de 20-30 ppm se observan cadenas alquílicas $\text{CH}_3\text{-CH}_2$, carbono del grupo funcional: metileno en alifáticos simples: CH_2 .

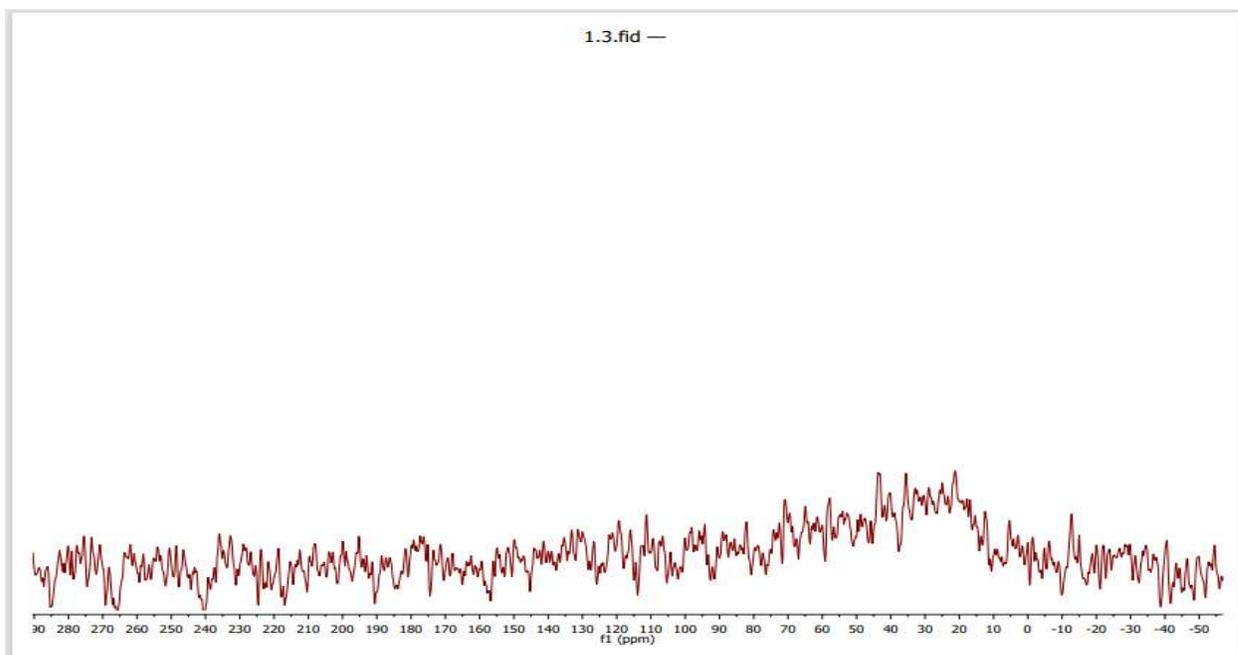


Figura 30. RMN ^{13}C CP MAS Arroz irrigado 0-10 cm inicio de ciclo

El único espectro que se logra identificar mejor es el correspondiente a la parcela de arroz de secano de 0-10 cm de profundidad y de inicio de ciclo (Figura 31), donde se identifica una zona alifática, 40 ppm grupos C-O (carbono unido a alógenos). En las zonas identificadas dentro de la imagen (Figura 31) 172,16 ppm carbonilo (carbono del grupo funcional carboxilo, éster y quinona: COO^* , COOH), 129,98 zona de anillo aromático (carbono del grupo funcional aromática: CH , C), 91,69; 74,81 ppm y 63,55 ppm pertenecen al carbono de grupo funcional: sacáridos, alcoholes y éter: CHOH , CH_2OH , $\text{CH}_2\text{-O}$. Para 52,63 ppm se identifica carbono del grupo funcional: metoxi, metino y carbono cuaternario:



CH₃O-, CH-NH, CH, C. En el caso de 32,99 ppm metileno en alifáticos simples: CH₂ y 24,01 ppm metil: CH₃. Para el caso de arroz al final del ciclo y el sistema agroforestal de bosque con cacao los espectros presentan mucho ruido, lo que impide una correcta estimación de los compuestos de carbono ubicados en cada región química.

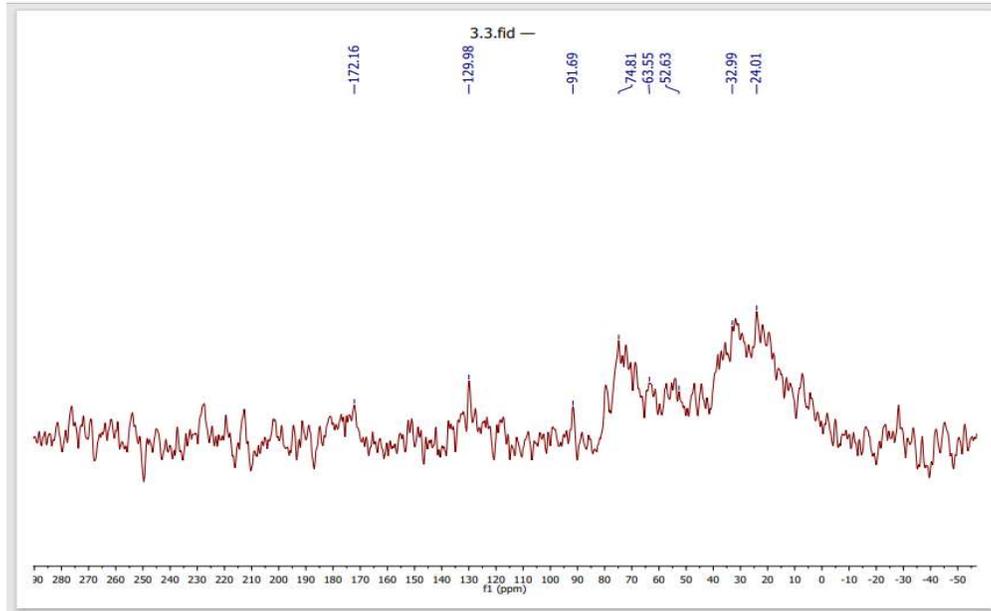


Figura 31. RMN ¹³C CP MAS Arroz de secano 0-10 cm inicio de ciclo

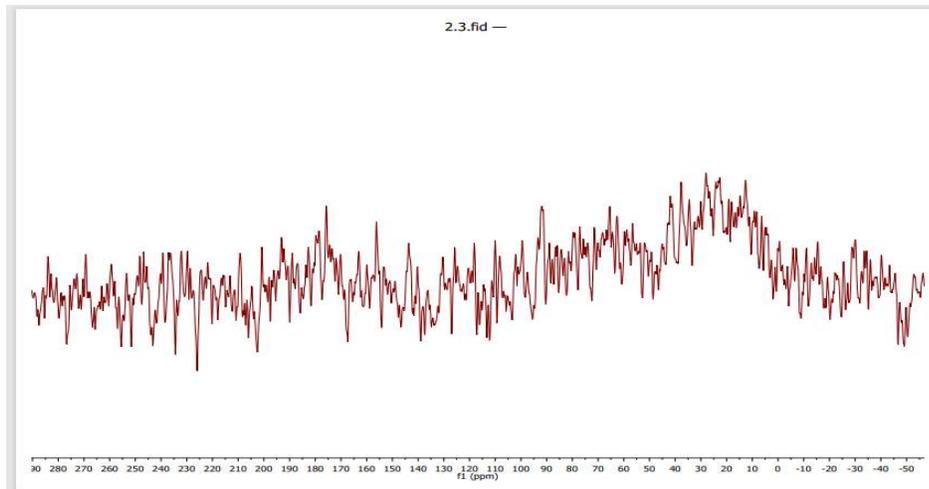


Figura 32. RMN ¹³C CP MAS Arroz irrigado 0-10 cm final de ciclo

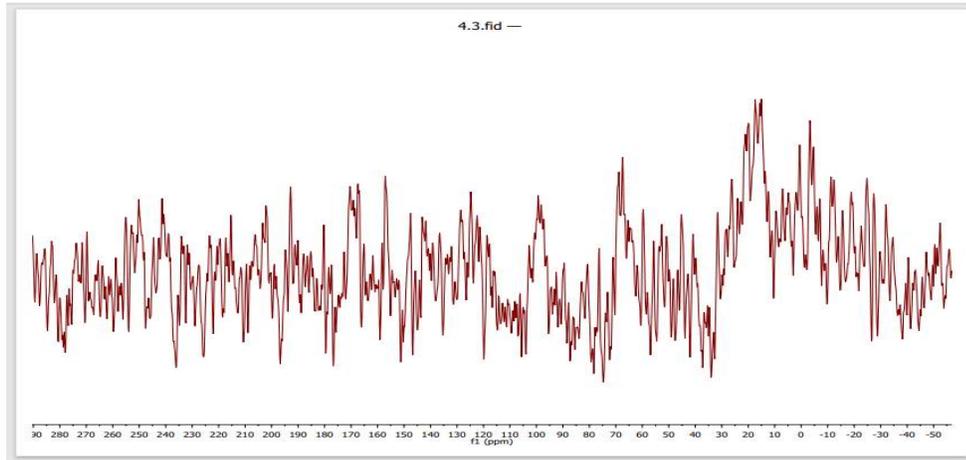


Figura 33. RMN ^{13}C CP MAS Arroz de secano 0-10 cm final de ciclo

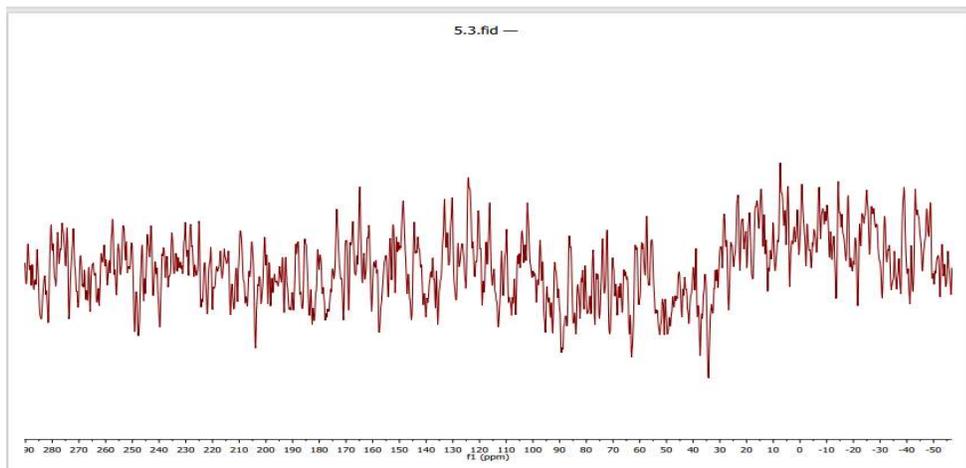


Figura 34. RMN ^{13}C CP MAS Bosque con cacao 0-10 cm inicio de ciclo

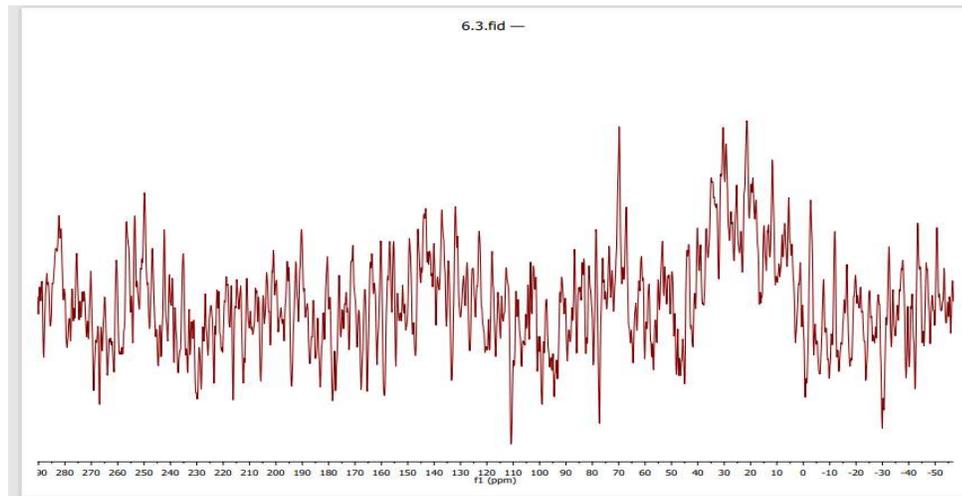


Figura 35. RMN ^{13}C CP MAS Bosque con cacao 0-10 cm final de ciclo

Con respecto a los espectros de ^{13}C -RMN en estado sólido con CP MAS que se utilizaron como herramienta analítica cuantitativa, no destructiva, al determinar el tipo de carbono presente en las estructuras moleculares que conforman la MOS, se observó que las bandas y/o picos presentaron características muy similares, lo cual se encuentra generalmente relacionado con el bajo contenido de materia orgánica en los suelos evaluados en las parcelas estudiadas o a la presencia de $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ para las tres profundidades (0-10 cm, 10-30 cm y 30-60 cm de profundidad).

5.7.2 Calidad de C por espectro de IR (infrarrojo).

A continuación, se muestran algunos espectros de infrarrojo evaluados por DRIFT (*Diffuse reflectance infrared Fourier Transform*) fondo Au en donde además se replicó por KBr y también se analizó por ATR (*Attenuated total reflection*) (Figuras 36-54). Los resultados muestran la presencia de caolinita en el suelo, evidenciada por las vibraciones de estiramiento de hidroxilo en la región 3800 a 3000 cm^{-1} , con mayor fortaleza a 3600 cm^{-1} .

En cuanto al contenido de cuarzo en el suelo las frecuencias se ubican en los rangos entre 1080 , 800 a 780 cm^{-1} , que en este caso se reflejan entre 1000 y 800 cm^{-1} .



fundamentales de estiramiento y flexión de O-Si-O encontrados entre las bandas más dominantes en los suelos ricos en espectros infrarrojos.

Se sabe que la materia orgánica consiste principalmente de ácidos poliaromáticos y alifáticos, amidas, ésteres y azúcares, junto con muchos otros componentes menores. Su efecto combinado es producir envolventes de banda ancha cerca de 3400 , 1600 y 1400 cm^{-1} . (Figuras 36, 37 y 38).

En el suelo de arroz irrigado (0-10 cm de profundidad) se observa una tensión de banda fuerte cerca de los 3600 cm^{-1} , tensión OH y N-H, 1600 cm^{-1} intensidad de la banda media, tensión $\text{C} \equiv$ aromático, 1000 cm^{-1} intensidad de banda media y ancha, que puede ser atribuida a los alcoholes y carbohidratos, cerca de 700 cm^{-1} intensidad de banda fuerte con hombro cuyo grupo corresponde a una deformación fuera del plano C-H del = C-H del anillo aromático o vibraciones debidas al Si-C (Figura 36). En general para los suelos evaluados las bandas y/o picos presentaron características muy similares, lo cual se encuentra generalmente relacionado con el bajo contenido de materia orgánica (Figuras 37-54).

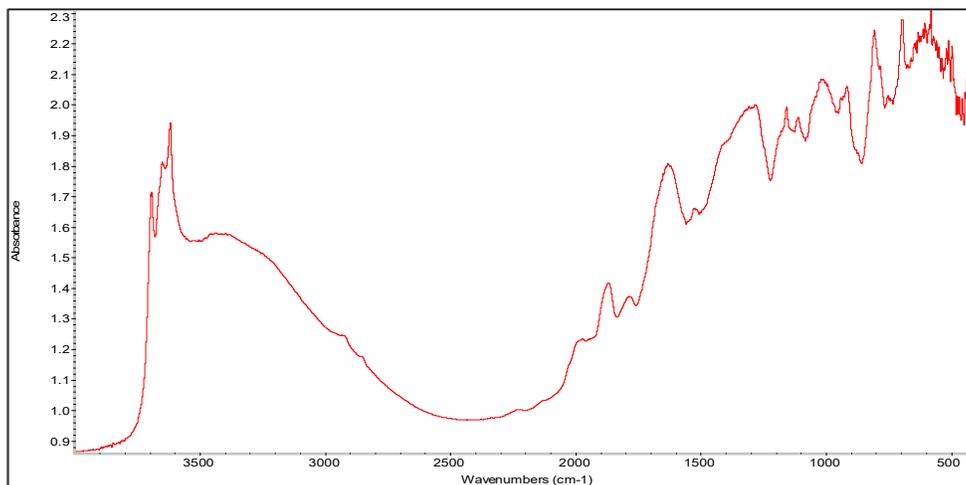


Figura 36. DRIFT Au en Arroz irrigado 0-10 cm

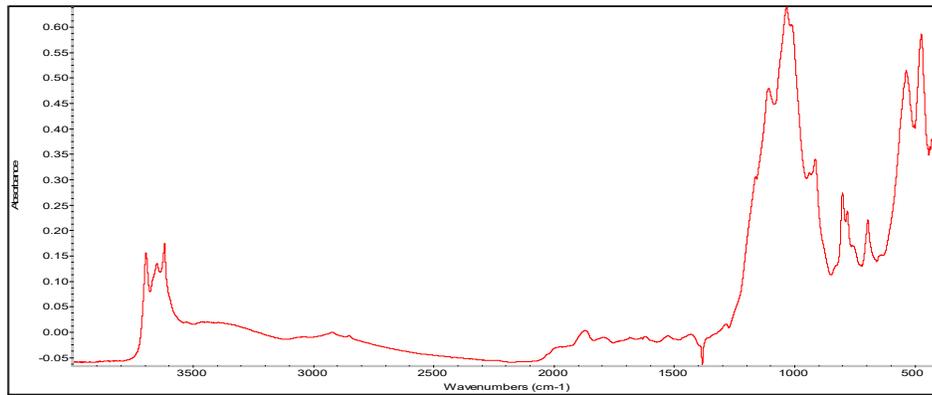


Figura 37. DRIFT KBr en Arroz irrigado 0-10 cm

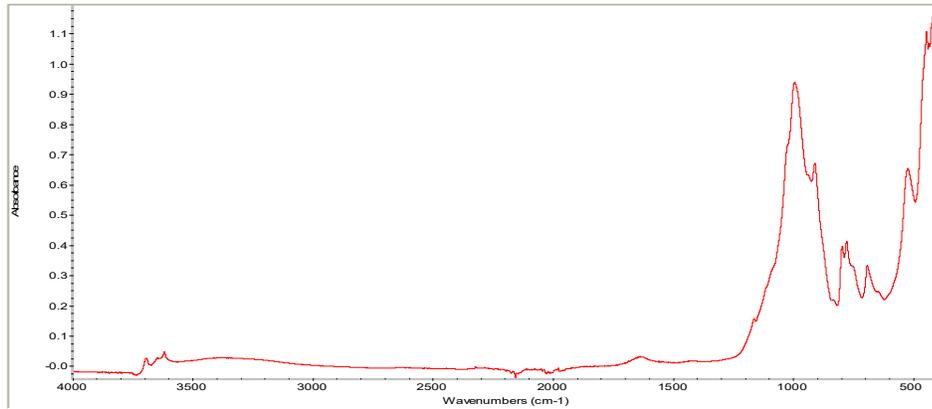


Figura 38. ATR en Arroz irrigado 0-10 cm

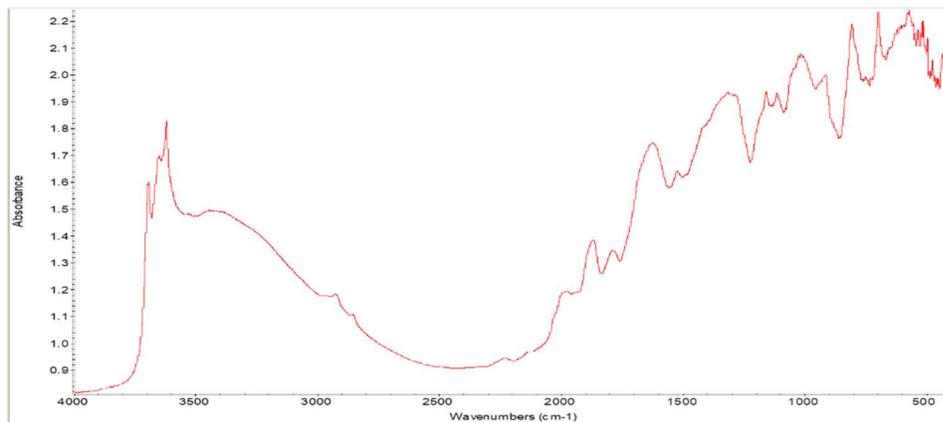


Figura 39. DRIFT Au en Arroz irrigado 10-30 cm

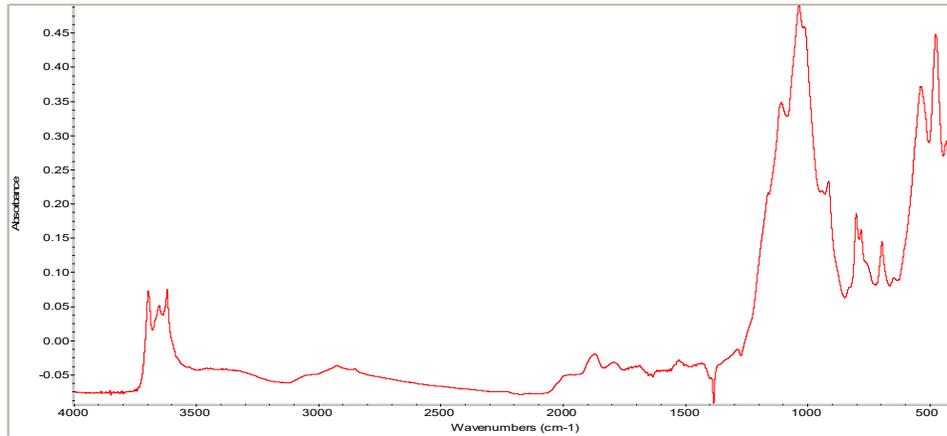


Figura 40. DRIFT KBr en Arroz irrigado 10-30 cm

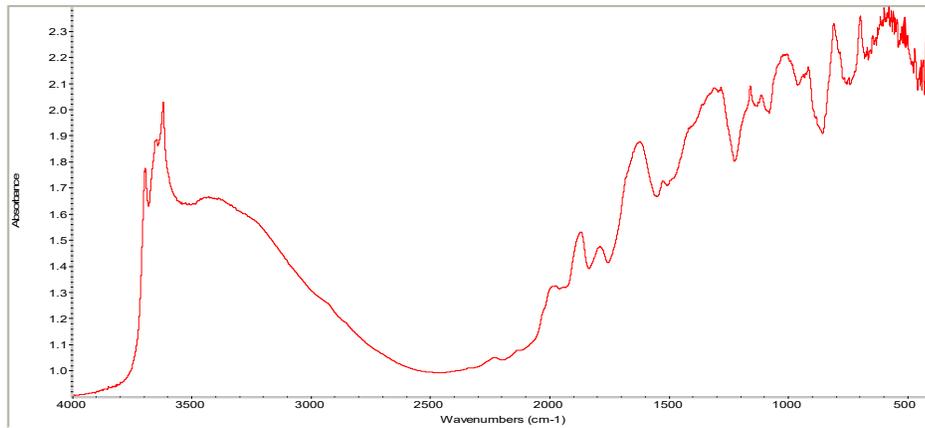


Figura 41. DRIFT Au en Arroz irrigado 30-60 cm

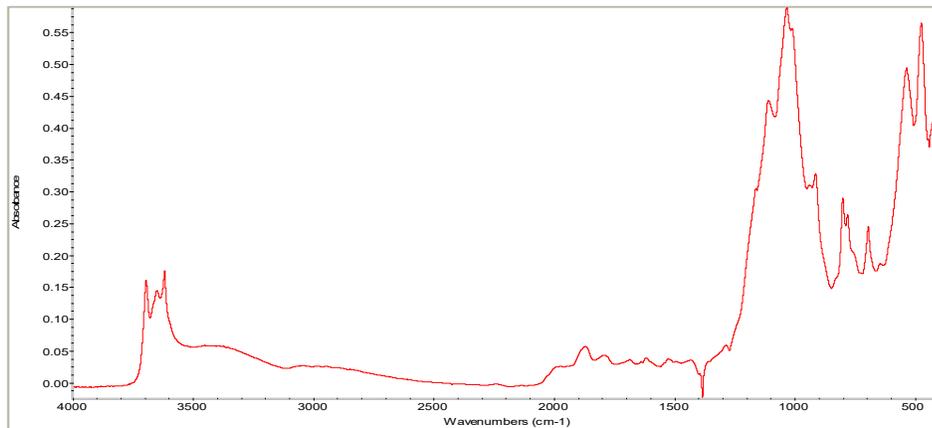


Figura 42. DRIFT KBr en Arroz irrigado 30-60 cm

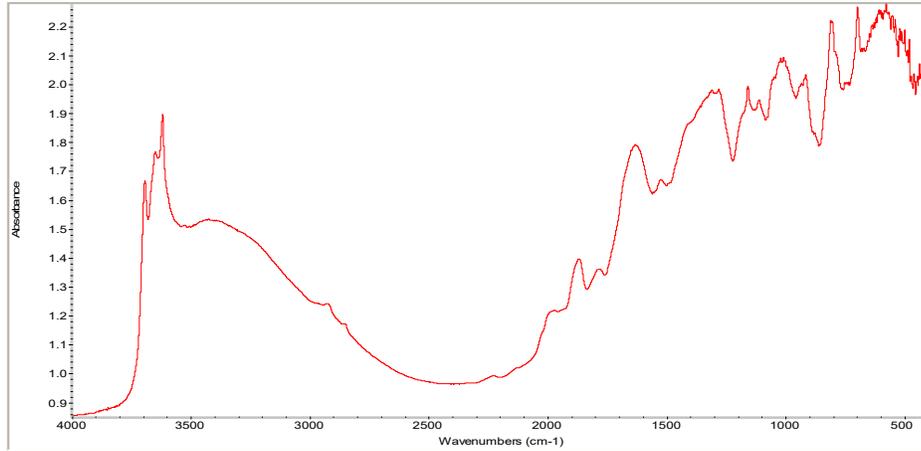


Figura 43. DRIFT Au en Arroz de secano 0-10 cm

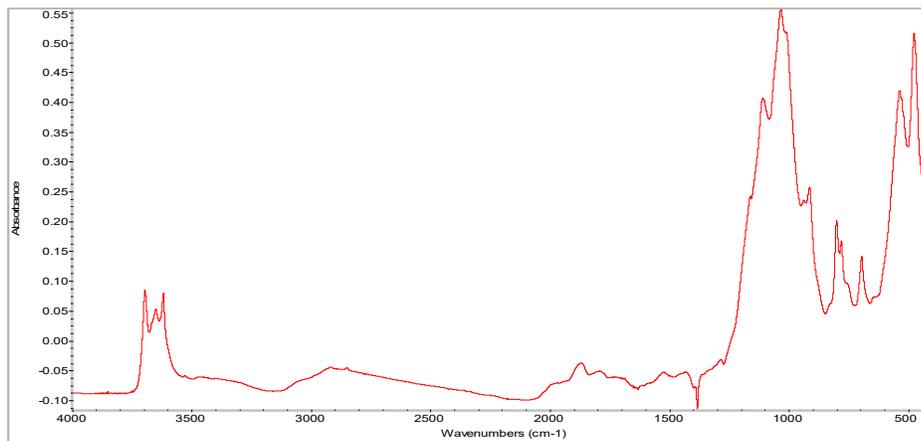


Figura 44. DRIFT KBr en Arroz de secano 0-10 cm

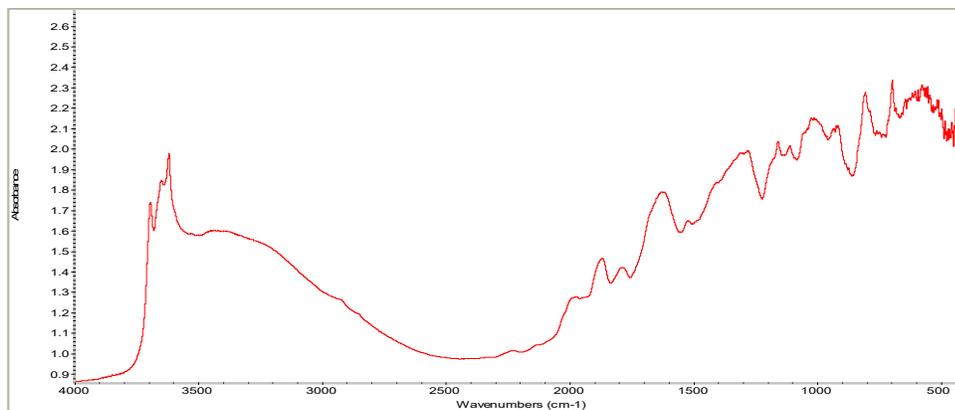


Figura 45. DRIFT Au en Arroz de secano 10-30 cm

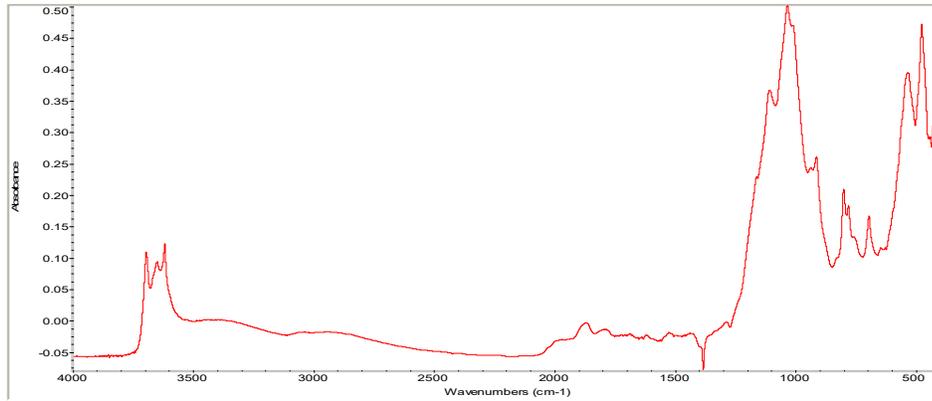


Figura 46. DRIFT KBr en Arroz de secado 10-30 cm

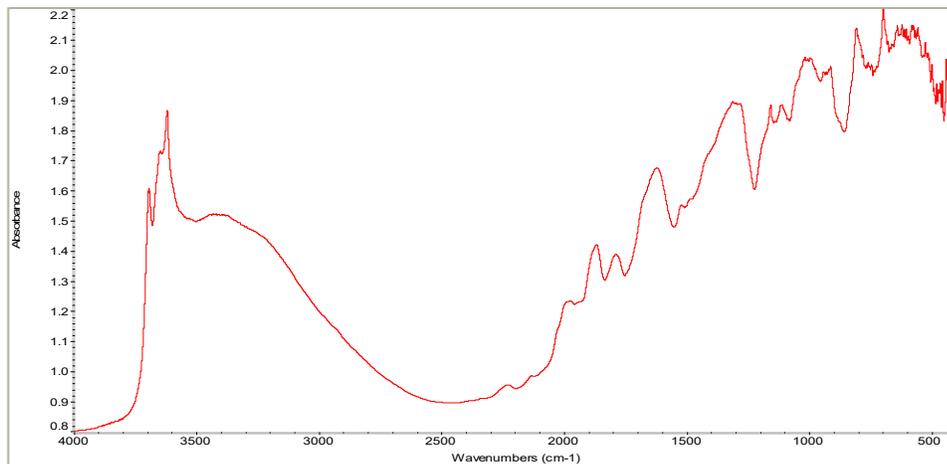


Figura 47. DRIFT Au en Arroz de secado 30-60 cm

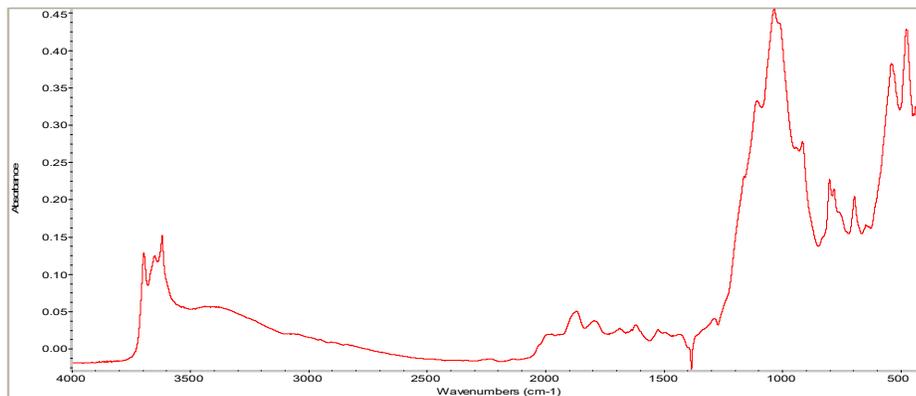


Figura 48. DRIFT Au en Arroz de secado 30-60 cm

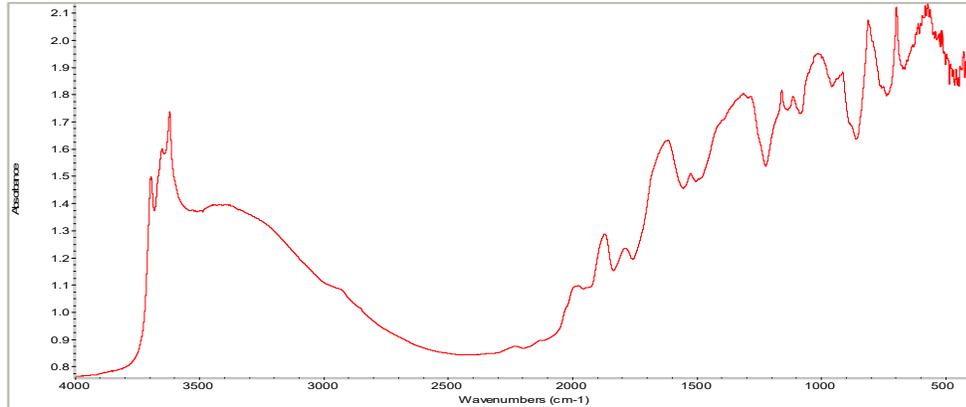


Figura 49. DRIFT Au en Bosque con cacao 0-10 cm

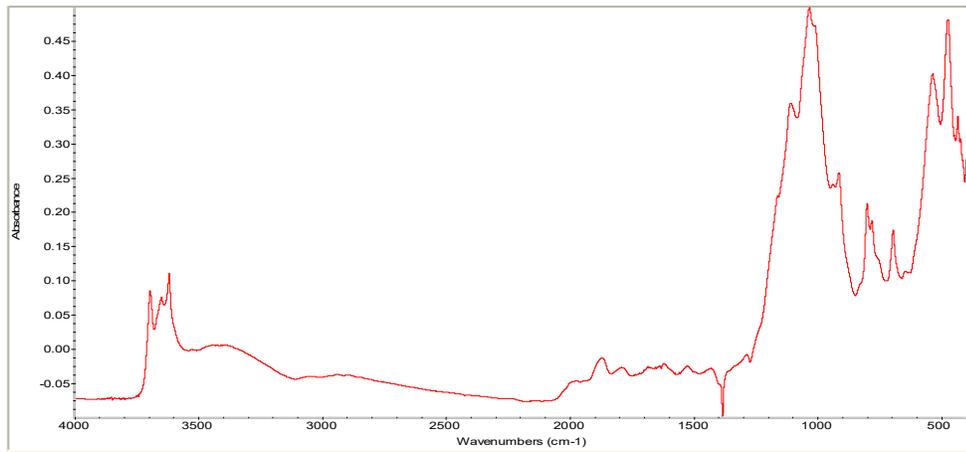


Figura 50. DRIFT KBr en Bosque con cacao 0-10 cm

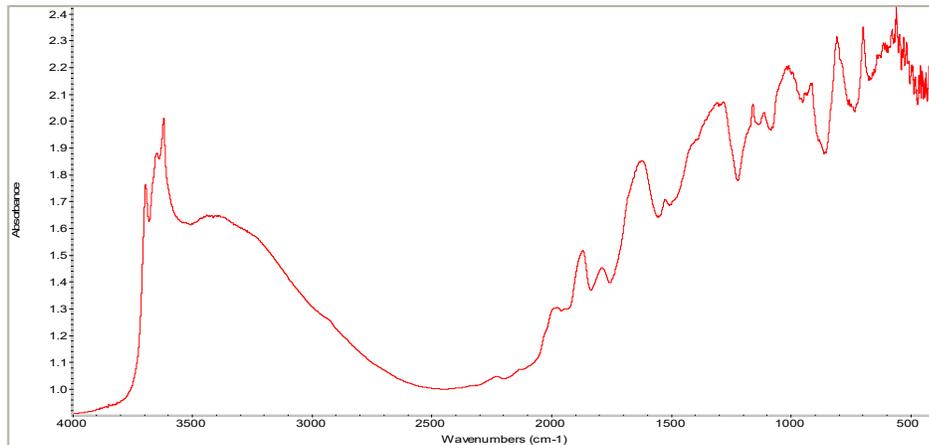


Figura 51. DRIFT Au en Bosque con cacao 10-30 cm

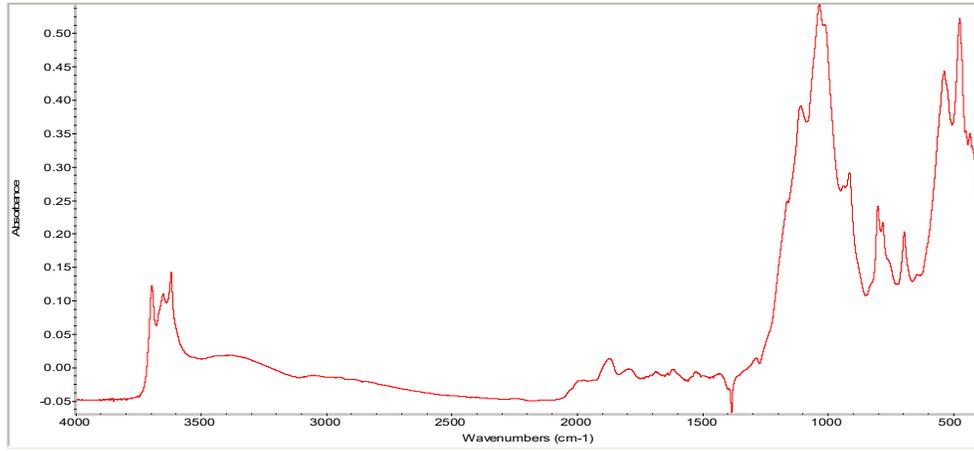


Figura 52. DRIFT KBr en Bosque con cacao 10-30 cm

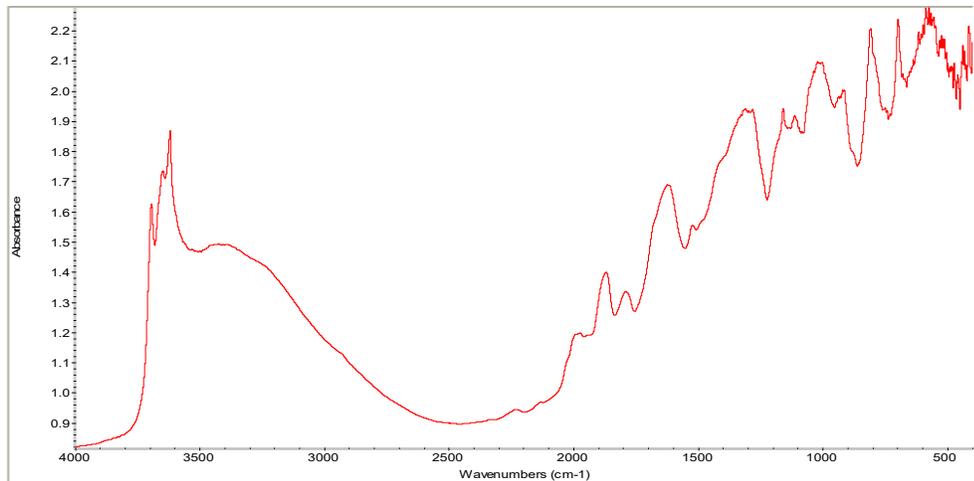


Figura 53. DRIFT Au en Bosque con cacao 30-60 cm

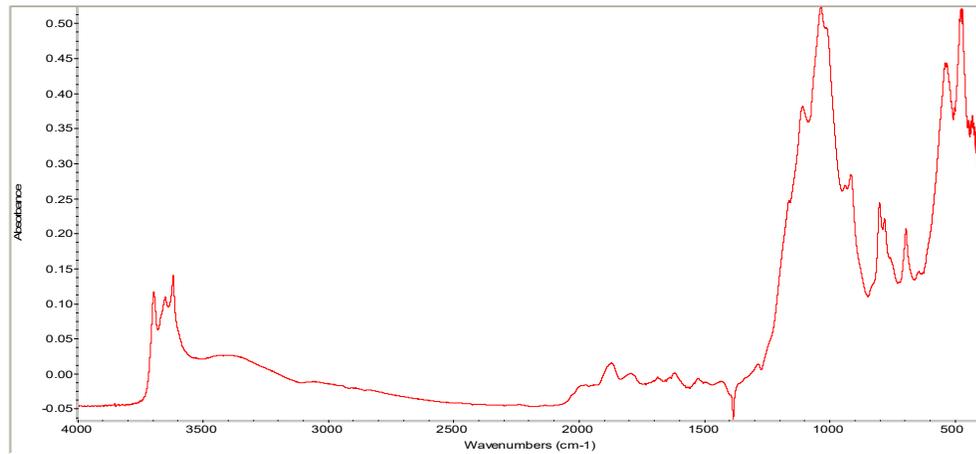


Figura 54. DRIFT KBr en Bosque con cacao 30-60 cm

El DRIFT fondo Au permite observar con mayor claridad las bandas o picos de la región de 2500 a 3800 cm^{-1} , y el DRIFT Fondo KBr permite observar con mayor claridad las bandas o picos de la región de 500 a 1000 cm^{-1} .

La Figura 55 muestra todos los espectros Vis-NIR procesados, la gráfica de puntajes de PCA para los espectros y la varianza X residual para PC-1 y PC-2. PC-1 y PC-2 explican el 73% y el 12% de la varianza total, respectivamente. El PC-1 puede explicar la variación relacionada con MOS de las muestras. Las cuales indican el mismo tipo de suelo Entisol, con ligeras variaciones respecto a la textura ya sea arcillosa o franco arcillo limosa (Tabla 6).

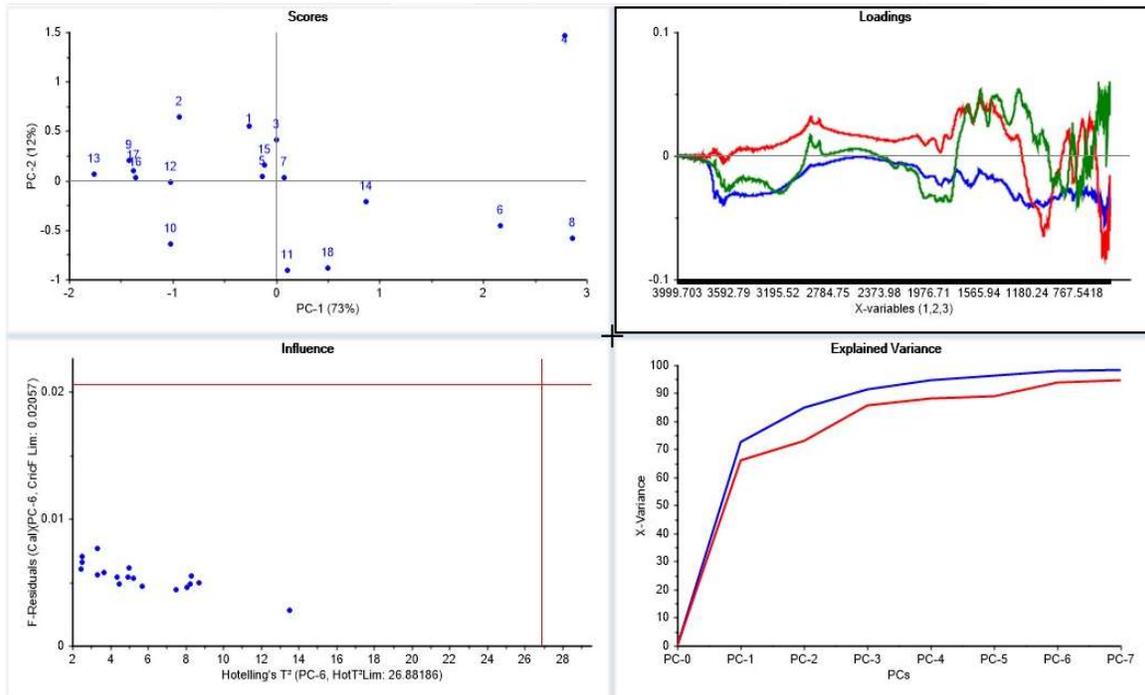


Figura 55. Estadísticos del espectro infrarrojo

5.8 Balance de entradas y salidas de carbono orgánico en el suelo

El balance de carbono en suelo superficial se estimó con la suma de los aportes o entradas expresados en kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}) correspondientes al carbono de las raíces, el carbono orgánico (CO) proveniente de la fertilización del arroz con 200 kg ha^{-1} de Urea, el carbono de la biomasa microbiana y el carbono de la necromasa. Mientras que las salidas o pérdidas totales se representaron con la suma de las emisiones de CH_4 y de CO_2 (Tabla 22), calculando la diferencia entre entradas y salidas para cada sistema de uso del suelo estudiado, y de este modo determinar el balance de carbono en el suelo.

Tabla 22. Balance del carbono orgánico del suelo superficial en los usos de suelo estudiados.

Uso de Suelo	Densidad aparente Mg m ⁻³	Entradas de CO (kg ha ⁻¹)					Salidas de CO (kg ha ⁻¹)			Diferencia (kg ha ⁻¹)
		Raíz-C	Urea - C	Biomasa Microbiana - C	Necromasa - C	Suma de Entradas	CH ₄ - C perdida	CO ₂ - C perdida	Suma Salidas	
Arroz irrigado	1,28	1766,25	40,00	23,06	626,38	2455,69	27,68	15271,90	15299,6	-12843,91
Arroz Secano	1,32	1920,00	40,00	22,11	574,87	2556,98	270,25	15232,00	15502,3	-12945,32
Agroforestal (Bosque con Cacao)	1,16	987,32	0,00	22,16	7818,23	8827,71	51,59	8772,50	8824,1	3,61

El aporte total de carbono orgánico muestra un comportamiento diferente entre las parcelas de arroz y el bosque con cacao, ya que el arroz de riego tuvo un 72,2% menos de aportes y el arroz de secano un 71,0% menos que el bosque con cacao. Esto se debió a que el CO aportado por la necromasa fue mayor en el bosque con cacao, siendo un aporte escaso en las parcelas de arroz, representando un 8,0% y un 7,4% en el arroz irrigado y de secano, respectivamente. Por el contrario, el aporte de CO por parte de las raíces en las parcelas de arroz es superior al aporte de CO de la necromasa, y al comparar entre los tipos de uso de suelo utilizados se observó que el aporte de las raíces finas del bosque en el suelo superficial es un 44% menos que el arroz irrigado y un 48% menos que el arroz de secano.

En lo que respecta a la biomasa microbiana, esta produjo entradas similares en las tres parcelas, lo que representa la entrada CO más baja en las parcelas de arroz.

Con respecto a las emisiones de C, se encontró que las emisiones de CO₂ son las más importantes en los tres tipos de uso de suelo: siendo en el arroz irrigado el 99,8% del total, en el arroz de secano un 98,3% del total y en el bosque con cacao un 99,4% del total. Al comparar las emisiones de CO₂ entre los tres usos, se observó que los arrozales tienen niveles de emisiones de CO₂ muy similares y el bosque tiene emisiones más bajas, representado el 43% de los anteriores.



La diferencia entre las entradas (aportes) y salidas (perdidas) permitió observar que las parcelas de arroz tienen un comportamiento negativo, lo que significa que son sistemas de uso de suelo que emiten carbono a la atmósfera, principalmente en forma de CO_2 , mientras que el bosque con cacao tiene un balance positivo en la dinámica del COS, representando un sumidero de carbono orgánico.



6. DISCUSIÓN

6.1 Evidencia de la degradación física y química del suelo

El suelo estudiado es de evolución incipiente con origen aluvial, a partir de sedimentos hidromórficos depositados en la planicie de inundación de la cuenca baja del río Zulia.

En la parcela del sistema agroforestal de bosque con cacao, las propiedades físico-químicas del suelo surgen de este proceso pedogenético. En el caso de las parcelas de arroz, se reportó un efecto negativo estadísticamente significativo sobre la densidad y la porosidad, que mostró degradación física por compactación del suelo y un proceso de acidificación (Tabla 10). Varios autores han informado sobre la degradación del suelo en la zona de estudio (Valenzuela *et al.*, 2015; Sacco *et al.*, 2012), quienes diagnosticaron la pérdida de espacio poroso debido a la compactación mediante la evaluación de las propiedades físicas de los suelos en cultivos de arroz, lo que resultó en un aumento de la densidad aparente (Da).

La porosidad total, a pesar de que a nivel superficial son mayores que a profundidad, no hay gran variación en función de la misma, esto es debido en gran parte por efectos de manejo y uso del suelo, lo que ocasiona una muy baja macroporosidad, inferior al 10 %, como resultado el suelo tiene déficit de suministro de aire para la actividad biológica y su alta microporosidad impermeabiliza el suelo, reteniendo el agua por más tiempo y en consecuencia incrementa la altura de la lámina de agua aumentando la presión con la que esta compacta el suelo.

Debido a lo mencionado anteriormente, se justifica cambiar el sistema de manejo del arroz irrigado (Gosling *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2010). Sin embargo, los resultados mostraron que después del primer año de cambiar a arroz con labranza en suelo casi seco y restricción de riego por inundación, las propiedades como la porosidad total, la densidad aparente y el pH no han mejorado. Por lo tanto, se debe realizar una evaluación adicional para identificar posibles cambios resultantes de cambios en el manejo del suelo a más largo



plazo. Según Busari *et al.* (2015), los cambios en el sistema de labranza del suelo impactan las condiciones físicas del mismo. La tasa y la cantidad del impacto dependen del sistema de labranza elegido y del tiempo transcurrido.

6.2 Carbono orgánico estable del suelo

Los resultados indicaron que las parcelas de arroz tienen un contenido de COS significativamente más bajo en comparación con el bosque con cacao (Tabla 10). Esto coincide con numerosos estudios que indican una disminución en el COS debido al monocultivo de arroz y otros cultivos bajo uso agrícola intensivo (Sun *et al.*, 2013; Valenzuela y Visconti, 2018). Esta notable diferencia se debe tanto a la diferencia en las cantidades de CO que ingresan al suelo debido a los aportes de necromasa, las raíces, los fertilizantes y la biomasa microbiana (Tabla 22) como a las diferencias en las pérdidas de C debidas a las emisiones de gases (Haque *et al.*, 2015; Muñoz-Rojas *et al.*, 2012).

Al observar la interacción de los factores de uso del suelo y etapa de muestreo sobre el contenido de COS (Figura 13), se puede observar que el bosque con cacao presenta un incremento desde la etapa inicial hasta la etapa final; por el contrario, en las dos parcelas de arroz, el contenido de COS es menor en la última etapa, lo que confirma que los dos sistemas de cultivo de arroz están perdiendo COS a lo largo del ciclo de cultivo, mientras que el bosque con cacao lo está ganando, lo que indica que el bosque funciona como sumidero de carbono (Wolf *et al.*, 2011; Don *et al.*, 2011). Sin embargo, para encontrar cambios en el contenido de COS causados por la modificación del manejo en labranza y riego en arroz es necesario utilizar periodos de tiempo más largos (Smith *et al.*, 2018; Álvaro-Fuentes *et al.*, 2018).

6.3 Carbono de la biomasa microbiana

La cantidad total de microorganismos presentes en el suelo representan la fracción viva de su materia orgánica y son muy sensibles a condiciones ambientales o alteraciones



debidas al manejo (Paolini-Gómez, 2017). La biomasa microbiana es considerada como una fracción lábil del COS y es un importante reservorio de nutrientes para las plantas, además tiene importantes funciones en el suelo, entre las que se destacan el reciclaje de residuos, (Marumoto *et al.*, 1982). Además, los microorganismos del suelo contribuyen directamente al COS con la formación y degradación de la biomasa microbiana (Miltner *et al.*, 2012; Lange *et al.*, 2018; Schmidt *et al.*, 2011).

El factor etapa tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el carbono de la biomasa microbiana, mostrando un comportamiento variante para las cinco etapas de muestreo (Figura 16). En la etapa 1 se presentaron valores superiores a la etapa 2 por corresponder al periodo de barbecho, mientras que el muestreo de la segunda etapa se realizó posteriormente a una disminución del sustrato para los microorganismos debido a la quema de los residuos de cosecha, la labranza y siembra (Biederbeck *et al.*, 1984). Posteriormente a las etapas 3, 4 y 5 hubo un aumento significativo en el carbono de la biomasa microbiana relacionada con el crecimiento de las raíces de las plantas (Gómez y Paolini, 2011). Esto se corresponde con la afirmación de que los aumentos en la rizósfera promueven y aumentan la comunidad microbiana, lo que resulta en una mayor actividad y biomasa microbiana (Lange *et al.*, 2015).

Durante cada ciclo del cultivo, las condiciones de humedad del suelo fluctuaron mensualmente, ya que en el primer ciclo las precipitaciones fueron mayores que en el segundo ciclo, generando un aumento en la humedad del suelo lo que produjo una mayor actividad microbiana en el suelo, lo cual concuerda con lo señalado por Gómez y Paolini (2011), quienes indicaron que mayores condiciones de humedad promueven el cambio del estado latente de las células microbianas a un estado metabólicamente activo; así como el mayor crecimiento de las plantas, lo que tiene efectos en incrementar la dinámica y actividad de las poblaciones microbianas.

Las variaciones en el contenido de humedad del suelo no sólo afectan la naturaleza de las poblaciones microbianas presentes en el suelo, sino que también pueden alterar la cantidad de nutrientes y la estructura física del entorno de los microorganismos (Tate *et al.*,



2000). Además, se observó que entre la etapa 3 y 4, el agricultor realiza la fertilización, lo que produce una bioestimulación de los microorganismos y trae consigo una mayor actividad. Así, la fertilización química promueve una mayor proliferación de raíces, exudados y acumulación de residuos orgánicos en el suelo, favoreciendo la cantidad total de microorganismos en el suelo (Omay *et al.*, 1997).

6.4 Carbono de la necromasa.

La descomposición de la necromasa en el suelo constituye la vía principal para que los nutrientes entren en el suelo y es uno de los aportes claves de COS (Avilés-Hernández *et al.*, 2009). Junto con el reciclaje de materia orgánica y nutrientes, se generan otros beneficios al suelo, como el aumento de la actividad de microorganismos y la mejora de las condiciones físicas y químicas (Manlay *et al.*, 2006).

En el sistema agroforestal del bosque con cacao, la producción de necromasa es catorce veces más alta que en el cultivo de arroz (Tabla 18), lo que representa el principal insumo de COS para el suelo (Malhi *et al.*, 2009). Por lo tanto, el principal impacto sobre la dinámica del COS generado por el aprovechamiento del cultivo de arroz en este suelo es la drástica disminución de los aportes por parte de la necromasa.

En cuanto a la etapa de cultivo, se observó que al final del ciclo de cultivo de arroz (Etapa 5) se incrementa significativamente el aporte de la necromasa, lo que representa un CO disponible para ser incorporado al suelo al momento de la labranza, resultando en un incremento de la actividad microbiológica y la mejora de las condiciones del suelo. Sin embargo, debido a la quema de los residuos de la cosecha de arroz, esto no se logró, representando una práctica muy dañina que altera la dinámica del COS y produce degradación del suelo.

6.5 Pérdidas de carbono por emisiones a la atmósfera

Los resultados mostraron que el suelo de arroz en ambos sistemas se comportó de manera similar como emisor de CO₂ y CH₄ (Tabla 20). Para el CH₄, la emisión se debe a las condiciones anaeróbicas que se desarrollaron en el sistema de arroz irrigado, lo que genera la proliferación de organismos metanogénicos anaeróbicos (estrictos, facultativos), lo que facilita aún más la actividad de degradación anaeróbica de la materia orgánica, desencadenando una mayor producción de CH₄ (Singh *et al.*, 1999). Esto concuerda con Irizari *et al.* (2012), quienes reportaron la relación entre las condiciones de inundación y las emisiones de CH₄ en un sistema de siembra y riego de arroz mecanizado. Cuanto mayor sea el espesor de la capa de agua colocada sobre el suelo en los cultivos, mayores serán los potenciales de reducción de CH₄ a nivel de subsuelo (Liu *et al.*, 2016).

Con respecto al sistema agroforestal del bosque con cacao (Tabla 20), existe total acuerdo con Kasimir-Klemedtsson *et al.* (1997) quienes encontraron que los ecosistemas forestales y agroforestales son una herramienta efectiva para reducir las emisiones de carbono a la atmósfera.

Las emisiones de dióxido de carbono representan las salidas de carbono más altas y, con respecto al sistema de uso del suelo, el arroz en ambos sistemas mostró los flujos de CO₂ más elevados. El suelo con arroz tenía una biomasa de raíces significativamente mayor en la superficie del suelo y un ciclo de crecimiento activo; estas altas emisiones de CO₂ se atribuyen principalmente a la respiración de las raíces de las plantas (respiración autótrofa) (Raich y Potter, 1995).

6.6 Calidad de C por ¹³C CP RMN MAS y/o Espectro IR (infrarrojo)

Se presentan compuestos de carbono en la región de los grupos Alquilos en rangos de 0-50 ppm (carbón alifático) y O-Alquilos en rangos de 50-112 ppm (N – y O- alquilos y acetatos) acorde a la clasificación de Faz *et al.* (2012) y Mosquera *et al.* (2010), los cuales dominaron en toda la MOS de las muestras de los suelos para el cultivo de arroz al inicio del ciclo de cultivo. Para el caso de arroz al final del ciclo y el sistema agroforestal de

bosque con cacao, los espectros presentan mucho ruido lo que impide una correcta estimación de los compuestos de carbono ubicados en cada región química.

En general, la materia orgánica del suelo (MOS) presentó las mayores intensidades en las señales (172,16; 129,98; 91,69; 74,81; 63,55; 52,63; 32,99; 24,01 ppm), $\delta = 220-162$ ppm (C=O), $\delta = 145-162$ ppm (C del fenol: -O-, C-OH), $\delta = 120-145$ ppm (C aromático: CH, C), $\delta = 60-96$ ppm (C del alcohol, éter, sacáridos: CHOH, CH₂OH, CH-O-), $\delta = 50-60$ ppm (C del metoxi, metino y cuaternario), $\delta = 25-35$ ppm (C del CH₂ en alifáticos simples) y $\delta = 0-25$ ppm (C del CH₃) respectivamente. Siendo el C del C del CH₃ seguido del CH₂ en alifáticos simples el más dominante en la MOS de todos los suelos caracterizados y el carbón C=O el menos dominante.

Investigadores como Mahieu *et al.* (1999), sobre la base de datos de RMN provenientes de la literatura de alrededor de 300 suelos, reportaron que los O-alquil constituyeron el grupo más abundante seguido por los alquilos y los aromáticos; los carbonilos fueron el grupo menos abundante. Con respecto a la abundancia del carbón alifático y aromático entre los suelos según Mosquera *et al.* (2010), se ha reportado que la MO de los suelos con altos contenidos de arenas contiene más unidades alifáticas que los suelos con altos contenidos de arcillas.

Según Pontevedra-Pombal *et al.* (2001) los espectros reflejan con elevada resolución la proporción de los distintos tipos de carbonos que componen la materia orgánica del suelo, siempre que esta carezca de altos contenidos de materiales paramagnéticos y se ajusten adecuadamente los tiempos de contacto.

Los espectros observados de infrarrojo para los sistemas evaluados (arroz irrigado, arroz de secano y bosque con cacao) a las tres profundidades (0-10, 10-30, 30-60 cm de profundidad en el suelo) indican la presencia de minerales como la caolinita, así como una alta presencia de cuarzo, lo cual corresponde al origen aluvial de los suelos estudiados. Para el caso de la materia orgánica para los dos sistemas estudiados (arroz y agroforestal de bosque con cacao) se observa escasa presencia de la misma indicando leves aumentos en su concentración.

En un estudio previo de ácidos húmicos, Skjemstad y Dalal (1987) demostraron que en el Infrarrojo y ^{13}C RMN los datos para los ácidos húmicos coincidieron ampliamente. Sin embargo, es evidente a partir de su trabajo con discos prensados de KBr que el contenido de información para sus espectros IR estaba limitado por la muy baja intensidad de las bandas de estiramiento de CH, la superposición de la absorción de agua cerca de 3400 y 1630 cm^{-1} y la posible contaminación por hidrocarburos del disco de KBr matriz.

De acuerdo con Nguyen *et al.* (1991), estos problemas son particularmente severos para suelos con bajo contenido orgánico. La técnica DRIFT, particularmente, tiene el potencial de reducir estas limitaciones eliminando la necesidad de la matriz de KBr, aumentando así la concentración efectiva y reduciendo el riesgo de contaminación. Lo cual coincide con los espectros más limpios obtenidos para el caso de la materia orgánica.

Existe un creciente interés en el desarrollo de soluciones rentables y rápidas de métodos para la medición de nitrógeno (N) y carbono (C) en el suelo, ya que hay una preocupación sobre el efecto del uso excesivo de fertilizantes nitrogenados en el medio ambiente y el aumento del contenido de C atmosférico, que podría limitarse mediante el secuestro de C en el suelo. Para gestionar de manera eficiente el N y C en los suelos, es necesario tener información detallada sobre las propiedades del suelo (Mouazen *et al.*, 2007).

La espectroscopia infrarroja ha sido ampliamente usada para la caracterización de los componentes que constituyen la MOS, ya que provee información valiosa sobre la estructura y grupos funcionales presentes en ella, complementando la información obtenida a través de los espectros de ^{13}C -RMN en estado sólido y de esta manera caracterizar estructuralmente la MOS (Mosquera *et al.*, 2010).

Algunas investigaciones donde se ha combinado análisis de espectros infrarrojos y resonancia magnética nuclear demostraron que las sustancias húmicas contienen una gran cantidad de carbón alifático (Hatcher *et al.*, 1981; Bollag, 2008) por lo que las diferencias que se encuentran en la composición química de la MOS se deben posiblemente a varios factores, tales como el grado de descomposición de la MOS, el origen, materiales

parentales y los factores ambientales (Ahmad *et al.*, 2006). De acuerdo con los resultados encontrados, los minerales, la MOS y los microorganismos que interactúan estrechamente en la humificación pueden estar siendo afectados por el régimen hídrico y la textura del suelo. Algunos autores, como Mosquera *et al.* (2010), indicaron que durante el proceso de humificación la cantidad de carbonos aromáticos y alifáticos se ve incrementada mientras que la cantidad de carbonos O-alkil disminuye.

6.7 Balance del COS en los sistemas de uso del suelo estudiados

Al igual que otros estudios (Liu *et al.*, 2016; Yan *et al.*, 2020), los resultados revelaron que los sistemas de cultivo de arroz presentan las mayores cantidades de salida de C y un balance negativo (Tabla 22), lo que indica que el cultivo de arroz tuvo la mayor pérdida de carbono debido a las altas emisiones de CO₂ de la actividad microbiana del suelo y asociado principalmente a una mayor respiración de las raíces del cultivo, tal y como lo señalaron Zornoza *et al.* (2018), quienes observaron una relación en las emisiones de gases de efecto invernadero con la estimulación del cultivo a través de la fertilización y el agua de riego.

Además, al interpretar el balance positivo del sistema agroforestal de bosque con cacao (Tabla 22), se observa que se pierde el 99,9% de los insumos, siendo las emisiones de CO₂ responsables del 99,4% de estas pérdidas, lo que indica una intensa actividad biológica alrededor de la descomposición de la MOS, produciéndose la mineralización de los abundantes residuos orgánicos, favorecida a su vez por las condiciones de alta humedad y temperatura favorable del suelo (Manzoni *et al.*, 2012; Valenzuela *et al.*, 2022).

6.8 Influencia de las prácticas de uso y manejo en cada agroecosistema sobre las emisiones de gases.

Los resultados mostraron que el suelo de arroz con riego se comportó como emisor de los tres GEI. Para el metano la emisión se debe a las condiciones anaeróbicas desarrolladas



en el sistema de arroz con riego, que genera la proliferación de organismos anaeróbicos metanogénicos (estrictos, facultativos), que facilitan la actividad de degradación anaeróbica de la materia orgánica, desencadenando una mayor producción de CH_4 , por lo que es una fuente de este importante gas de efecto invernadero, lo que concuerda con lo encontrado por Singht *et al.* (1999), quienes mencionan que la emisión de CH_4 se debe a condiciones anaeróbicas desarrolladas en el sistema de arroz de regadío.

Esto coincide por lo citado por Irizarri (2012), quien encontró influencia de la inundación con los flujos de CH_4 en comparación con la regulación e inundación tardía, bajo siembra mecanizada y el manejo del arroz bajo riego. La mayor emisión de metano en el tipo de uso del suelo de arroz con riego se asocia a la condición anaeróbica del suelo, debido al riego por inundación, que mantiene saturado el suelo la mayor parte del ciclo del cultivo. Cuanto mayor sea el espesor de la capa de agua colocada sobre el suelo en los cultivos, mayor es el potencial de reducción de CH_4 a nivel del subsuelo (Liu *et al.*, 2016).

En cuanto a la parcela de bosque con cacao, donde en cuatro de los cinco muestreos se observó un comportamiento de sumidero para el metano, revela el importante servicio ambiental que prestan los suelos con bosque, al secuestrar GEI. Lo encontrado se encuentra en plena coincidencia con investigaciones de Kasimir *et al.* (1997) quienes encontraron que el bosque y la agrosilvicultura son una herramienta eficaz para reducir las emisiones de carbono a la atmósfera, puesto que los sistemas forestales y agroforestales son una herramienta eficaz para contener el aumento de los GEI, ya que a través de la fotosíntesis acumulan una mayor cantidad de carbono en la biomasa.

La captura de CH_4 en el suelo, obedece a la oxidación del CH_4 por parte de un conjunto de bacterias metanótrofas. Estas bacterias metano-oxidantes, presentes en la capa aerobia del suelo oxidan el CH_4 con O_2 molecular, usándolo como fuente de carbono y energía evitando la emisión hacia la atmósfera.

Para el caso del óxido nitroso, se encontró que el suelo de arroz con riego, mostró un comportamiento coincidente con los estudios de Ferreira (2006), donde las emisiones de N_2O se llevan a cabo en condiciones anaeróbicas, indicando que con contenidos de agua en



el suelo se favorecen los procesos de nitrificación y denitrificación, que dan como resultado la producción de N_2O .

La medición de gases de efecto invernadero (GEI) permitió determinar que el comportamiento de cada GEI (metano, dióxido de carbono y óxido nitroso) es diferente según el tipo de uso del suelo y la etapa del cultivo. Las curvas de emisión mostraron que el suelo en todos los tipos de uso y en todas las etapas de cultivo, se comportó como emisor o fuente de dióxido de carbono. Mientras que para el metano y el óxido nitroso hay situaciones en que el suelo es sumidero o secuestrador.

El flujo de los gases CO_2 y N_2O está afectado significativamente por el factor etapa del cultivo, mientras que para el flujo de CH_4 no hay efecto significativo. Para el óxido nitroso la menor emisión fue en la tercera etapa y la mayor emisión fue en la primera etapa, mientras que para el dióxido de carbono la menor emisión fue en la segunda etapa y la mayor emisión se registró en la cuarta etapa. Para el flujo de metano existe un efecto estadísticamente significativo del factor tipo de uso del suelo, siendo el arroz con riego el uso que muestra el mayor flujo de CH_4 y el bosque con cacao el uso con el menor flujo de CH_4 .



7. CONCLUSIONES

El cambio de uso de riego y labranza implementado un año atrás en el cultivo de arroz en el distrito de riego Río Zulia no ha provocado una diferencia significativa en los aportes de CO al suelo, ya que el arroz de riego tuvo un 72,2% menos de aportes y el arroz irrigado un 71,0% menos de aportes en comparación con el bosque con cacao. Tampoco las salidas por emisiones de carbono en forma de CH₄ y CO₂ tuvieron diferencias significativas.

Además, se encontró que el cultivo de arroz es un sistema de uso del suelo con mayores pérdidas brutas de CO (-12.843 kg ha⁻¹ en arroz irrigado y -12.945 kg ha⁻¹ en arroz de secano), actuando como fuente de gases de efecto invernadero principalmente debido a emisiones de CO₂ relacionadas con la intensa estimulación de la respiración radicular de los cultivos y en menor medida con la actividad microbiológica del suelo.

La comparación de la dinámica del COS entre el sistema agroforestal de bosque con cacao y los sistemas de cultivo de arroz permitió observar que el sistema agroforestal es un sumidero de carbono con un balance de CO positivo (3,6 kg ha⁻¹) asociado al aporte significativo de CO proveniente de la necromasa (7818 kg ha⁻¹), suficiente para almacenar COS, aunque también hubo una importante emisión de CO₂ asociada a la descomposición y mineralización de esa materia orgánica a partir de residuos vegetales.

La comparación del balance de COS en el suelo superficial entre los sistemas de cultivo de arroz y el sistema agroforestal permitió identificar una diferencia significativa en el contenido de COS entre los diferentes usos, con un mayor contenido en el suelo del bosque con cacao.

El análisis de infrarrojo para los sistemas evaluados indica la presencia de minerales como la caolinita, así como una alta presencia de cuarzo, lo cual corresponde al origen aluvial de los suelos estudiados. En los tres sistemas de uso y manejo estudiados se observa escasa o mínima presencia de materia orgánica en algunos espectros, indicando leves

aumentos en su concentración. Para el caso de RMN ^{13}C CP MAS se observaron algunos compuestos de carbono pertenecientes a grupos Alquilo y O-Alquilo.

8. REFERENCIAS

Acosta, J.A, Carmona, D.M, Faz, A., Gabarrón, M., Gómez, M., Martínez, S., Moreno, J., Muñoz, M., Rosales, R., Soriano, J.M, Terrero, M., Zornoza, R. (2018). Métodos de análisis de suelos. Grupo de Investigación en Gestión, aprovechamiento y recuperación de suelos y aguas (GARSA). Universidad Politécnica de Cartagena, España. 221 p.

Adeel, M., Zain, M., Shafi, J. Ahmad, M., Rizwan, M. Shafiq, M., Rui, Y. (2018). Conservation agriculture, a way to conserve soil carbon for sustainable agriculture productivity and mitigating climate change: a review. *Fresenius Environmental Bulletin*. 27, 6297 – 6308.

Ahmad, R.; Nelson, P. N.; Kookana, R. S. (2006). The molecular composition of soil organic matter as determined by ¹³C NMR and elemental analyses and correlation with pesticide sorption. *European Journal of Soil Science*. 883-893.

Albaladejo. J.; Martínez-Mena, M.; Almagro, M; Ruiz-Navarro, A; Ortiz, R. (2019). Factores de control en la dinámica del Carbono Orgánico de los suelos de la Región de Murcia. *Soil Erosion and Desertification*. España. 155-158 p.

Almendros, G. (2004). Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de la materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono en el suelo. *Edafología* 11 (2), 229-248.

Álvaro-Fuentes, J., Plaza-Bonilla, D., Arrúe, J., Bielsa, A., Cantero-Martínez, C. (2018). *Soil Carbon Dynamics Under Different Land Uses in Dryland Mediterranean Conditions*.



Soil Management and Climate Change. 39 – 51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812128-3.00004-5>

Avilés-Hernández V., Velázquez-Martínez, A., Ángeles-Pérez, G., Etchevers-Barra, J., De los Santos-Posadas, H., Llanderal, T. (2009). Variación en almacenes de carbono en suelos de una toposecuencia. *Agrociencias* 43, 457 – 464.

Biederbeck, V., Campbell, C., Zentner, R. (1984). Effect of crop rotation and fertilization on some biological properties of a loam in southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal Soil Science*. 64, 355-367.

Bollag, J. M. Interactions of Soil Components and Microorganisms and their Effects on Soil Remediation. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. (2008). 28-32.

Busari, M., Kukal, S., Kaur, A., Bhatt, R., Dulazib, A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*. 3, 119 – 129.

Christensen, B.T. (1996). Carbon in primary and secondary organomineral complexes, RC, Boca Raton 126 p.

Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks a meta-analysis. *Global Change Biology* 17, 1658–1670.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>

FAO. (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia.

Faz, A., Mermut, A., Ortiz, R., Benke, M, Chatson, B. (2002) ^{13}C CP MAS NMR spectra of organic matter as influenced by vegetation, climate and soil characteristics in soils from Murcia, Spain. Canadian Journal Soil Science 82, 403-411.

Fedearroz. (2018). Estadísticas. Revista Arroz. 66, 54 – 56. In:
<https://www.fedearroz.com.co>

Ferreira, O. (2006). Flujos de gases de efecto invernadero, potencial de calentamiento global y evaluación de energía del sistema agroforestal Quesungual en el sur de Lempira, Honduras. Palmira – Colombia. 98 p.

Fonseca-González, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbón vegetal en ecosistemas forestales tropicales. Revista de Ciencias Ambientales. Tropical Journal of Environmental Science. 51, 91 – 109.

Fortin, M., Rochette, P., Pattey, E. (1996). Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no tillage small grain cropping systems. Soil Science Society of America Journal. 60, 1541-1547.

Freibauer, A, Rounsevell, M, Smith, P, Verhagen, J. (2004). Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. Geoderma, v.122, 1-23. 122.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.021>.

Frouz J, Elhottová D, Pizl V, Tajousky K, Sourková M, Píček T, Maly, S. (2007). The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: a laboratory study. Appl Soil Ecol. 2007; 37:72-80.

Gómez, Y., Paolini, J. (2011). Variación en la actividad microbiana por cambio de uso en suelos en sabanas, Llanos Orientales, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*. 59, 1 – 15.

Gosling, P., Parsons, N., Bending, G. (2013). What are the primary factors controlling the light fraction and particulate soil organic matter content of agricultural soils? *Biology and Fertility of Soils*, 49, 1001-1014. <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0791-9>

Haque, M., Yoon Kimb, S., Won Kima, G., Kim, P.J. (2015). Optimization of removal and recycling ratio of cover crop biomass using carbon balance to sustain soil organic carbon stocks in a mono-rice paddy system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 207, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.022>

Hatcher, P. G.; Schnitzer, M.; Denis, L. W.; Maciel, G. E. (1981). Aromaticity of humic substances in soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1089-1094.

Herrera, J., Solórzano, D., Argüello, H. & Rodríguez, A. (2013). Determinación de emisiones de metano y óxido nítrico generadas en plantaciones de arroz en Guanacaste, Costa Rica. *Ciencias Ambientales*.

Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F., Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*. 45, 27 – 36.

IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006^a). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento Norte de Santander. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.

IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (2006b). Métodos analíticos de laboratorio de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.

IPCC. (2007). Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Informe especial del grupo de trabajo III del IPCC. Publicado Por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, OMM-PNUMA.

Irisarri, P., Pereyra, V., Fernández, A., Terra, J., Tarlera, S. (2012). Emisiones de CH₄ y N₂O en un arrozal: primeras medidas en el sistema productivo uruguayo. *Agrociencia Uruguaya*. 16, 1 – 10.

Janik, L.J., Merry, R.H., Skjemstad, J.O. (1998). Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions?. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38, 681-696.

Kane, D. (2015). Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices, s.l.: s.n.

Karlen, D., Ditzler, C., Andrews, S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*. 114, 145 – 156.

Kasimir, A., Klemetsson, L., Berglund, K., Martikainen, P., Silvola, J., Oenema, O. (1997). Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: A review. *Soil Use and Management*. 13, 245 – 250. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00595.x>

Lal, R. (2001). World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, 71: 145-191.

Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*. 304, 1623- 1627. [https://doi.org/ 10.1126/science.1097396](https://doi.org/10.1126/science.1097396)

Lal, R. (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂ – enrichment. *Soil Till*, 81-107 p.

Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *BioScience* 60:708–721

Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., Mellado-Vázquez, P. G., Malik, A. A., Roy, J., Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B. C., Trumbore, S. E. & Gleixner, G. (2015). Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6: 6707. [https://doi: 10.1038/ncomms7707](https://doi.org/10.1038/ncomms7707).

Lavelle, P., Spain, A. (2001). *Soil ecology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Liu, S., Zhang, Y., Zong, Y., Hu, Z., Wu, S., Zhou, J., Jin, Y., Zou, J. (2016). Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis. *Global Change Biology Bioenergy*. 8, 392 – 406.
[https://doi.org/ 10.1111/gcbb.12265](https://doi.org/10.1111/gcbb.12265)

Lozano, Z., R. Hernández, A. Ojeda. (2005). *Manual de métodos para la evaluación de la calidad física, química y biológica de los suelos*. Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela.

Mahieu, N.; Powelson, D. S.; Randall, E. W. (1999). Statistical Analysis of Published Carbon- ¹³C CPMAS NMR Spectra of Soil Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal*. 307-319

Malhi, Y., Aragão, L., Metcalfe, D., Paiva, R., Quesada, C., Almeida, S., Anderson, L., Brando, P., Chambers, J., Da Costa, A., Hutya, L., Oliveira, P., Patiño, S., Pyle, E., Robertson, A., Teixeira, L. (2009). Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology* 15, 1255 – 1274. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01780.x>

Malyan, S.K.; Kumar, S.S.; Fagodiya, R.K.; Ghosh, P.; Kumar, A.; Singh, R.; Singh, L. (2021). Biochar for environmental sustainability in the energy-water-agroecosystem nexus, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 149, 111379, ISSN 364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111379>

Manlay, R., Feller, C., Swift, M. (2006). Historical evolution of soil organic matter. Concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 119, 217 – 233. <https://doi.org/10.1016/j.agree.2006.07.011>

Marques, J.D.D.O.; Luizão, F.J.; Teixeira, W.G.; Sarrazin, M.; Ferreira, S.J.F.; Beldini, T.P.; Marques, E.M.D.A. (2015). Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central Amazonia. *R. Bras. Ci. Solo*, 39:232-242.

Martínez, E., J. Fuentes, E. Acevedo. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Science and plant Nutrition* 8(1) 68 -96.

Marumoto, T., Anderson, J., Domsch, K. (1982). Mineralization of nutrients from soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*. 14, 469 – 465. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(82\)90106-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(82)90106-7)

Manzoni S, Porporato A. (2009). Soil carbon and nitrogen mineralization: theory and models across scales. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1355–1379.

Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., Ågren, G. (2012). Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*. 196, 79 – 91. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x>

Mondini, C., Sequi, P. (2008). Implication of soil C sequestration on sustainable agriculture and environment. *Waste & Management* 28, 678 – 684. <https://doi:10.1016/j.wasman.2007.09.026>

Minasny, B., Sulaeman, Y., Mcbratney, A. (2011). Is soil carbon disappearing? The dynamics of soil organic carbon in Java. *Global Change Biology*. 17, 1917 – 1924. <https://doi: 10.1111/j.1365-2486.2010. 02324.x>

Miltner, A., Bombach, P., Schmidt-Bruecken, B. & Kaestner, M. (2012). SOM genesis: microbial biomass as a significant source. *Biogeochemistry* 111, 41–55.

Mona, S.; Malyan, S.K.; Saini, N.; Deepak, B.; Pugazhendhi, A.; Kumar, S.S. (2021). Towards sustainable agriculture with carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation using algal biochar, *Hemosphere*, Volume 275, 129856, ISSN 0045- 6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129856>.

Mosquera, C., Martínez M., Guerrero J., Hanssen E. (2010). *Revista colombiana de química*. ISSN 0120-2804. Universidad Nacional de Colombia. Vol. 39 No. 1. 47-60.

Mouazen, A. M.; Maleki, M. R.; De Baerdemaeker, J., Ramon, H. (2007). On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. *Soil and Tillage Research*, Vol.93, No.1, ISSN 0167-1987, pp.13- 27.

Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Zavala, L.M., De la Rosa, D., Abd-Elmabod, S.K., Anaya-Romero, M. (2012). Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses (Southern Spain). *Solid Earth* 3, 375–386.

Nguyen,T.T., Janik, L.J, Raunpach,M. (1991). Diffuse reflectance infrared Fourier transform (DRIFT) spectroscopy in soil studies. *Australian Journal of Soil Research* 29, 49-67.

Omay, A.B., C.W. Rice, L.D. Maddux & W.B. Gordon. (1997). Changes in soil microbial and chemical properties under long-term crop rotation and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1672-1678.

Paolini-Gómez, J. (2017). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana* 36, 13-22.
<https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>

Paul, E. (2014). *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. Academic Press. pp. 598.

Park, B., Shin, J. (2008). Soil organic matter and nutrient accumulation at the abandoned fields. *Journal of Korean Forest Society*. 97, 492–500.

Pla, I. (1983). Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Rev. Fac. Agron. Alcance* 32.



Pla, I. (2010). Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes. I – Propiedades mecánicas. *Suelos Ecuatoriales* 40, 75-93.

Pontevedra-Pombal, X., Martínez-Cortizas, A., Garcia-Rodeja, E., Buurman, P., Van Lagen, B. (2001). Composición y transformación de la materia orgánica en un histosol de la Serra do Xistral (Norte de Galicia) mediante CPMAS ¹³C-NMR. *Edafología* 8 (2), 67-79.

Post, W.M., Kwon, K.C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6, 317–327.

Preston, C.M. (1996). Applications of NMR to soil organic matter analysis: history and perspectives. *Soil Science* 161, 144-166.

Preston C.M., Trofymow, J.A, Nilu J., Fyfe C.A. (1998). ¹³C PMAS -NMR spectroscopy and chemical analysis of coarse Woody debris in coastal forest of Vancouver Island. *Forest Ecology and Management* 111 (1-2), 51-68.

Raich, J. W., Potter, C. S. (1995). Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(1): 23-36. <https://doi.org/10.1029/94GB02723>

Rees, M., Condit, R., Crawley, M., Pacala, S., Tilman, D. (2001). Long-Term Studies of Vegetation Dynamics. *Science* (New York, N.Y.). 293. 650-5.
<https://doi.org/10.1126/science.1062586>.

Reeves, D.W. (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research* 43, 131–167.



Sacco, D., Cremon, C., Zavattaro, L., Grignani, C. (2012). Seasonal variation of soil physical properties under different water managements in irrigated rice. *Soil and Tillage Research*. 118, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.011>

Saljnikov, E., Cakmak, D., Rahimgalieva, S. (2013). Soil Organic Matter Stability as Affected by Land Management in Steppe Ecosystems. <https://doi.org/10.5772/53557>

Singh, S., Singh, J., Kashyap, A. (1999). Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*. 31, 1219 – 1228. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00027-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00027-9)

Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K., Batten, K. M. (2006). Bacterial and Fungal contributions to Carbon Sequestration in Agrosystems. *Soil Science Society of America*, 70(2): 555-569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>

Skjemstad, J.O, Dalal, R.C (1987). Spectroscopic and chemical differences in the organic matter of two subjectes to long periods of cultivation. *Aust. J. Soil Res.*25, 323-35.

Smith, P. (2004). Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy* 20, 229–236.

Smith, P., Falloon, P, Franko, U., Körschens, M., Lal, R., Paustian, K., Powlson, D., V., Shevtsova, L., Smith, Jo. (2007). Greenhouse Gas Mitigation Potential in Agricultural Soils. https://doi.org/10.1007/978-3-540-32730-1_18

Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S. & E. Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478: 49–56. <https://doi: 10.1038/nature10386>.

Smith, E.G, Janzen, H.H, Ellert, B.H. (2018). Soil organic carbon changes as influenced by carbon inputs and previous cropping system. *Canadian Journal of Soil Science* 98, 566–569. <https://doi.org/10.1139/cjss-2017-0120>

Stehfest, E., Bouwman, L. (2006). N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutri. Cycl. Agroecosyst.* 74, 207–228.

Soriano-Disla, J.M., Janik, L.J., Viscarra Rossel, R.A., MacDonald, L.M., McLaughlin M.J. (2014). The performance of visible, near-, and mid-infrared reflectance spectroscopy for prediction of soil physical, chemical, and biological properties. *Applied Spectroscopy Reviews*, 49, 139-186.

Sun, Y., Huang, S., Yu, X., Zhang, W. (2013). Stability and saturation of soil organic carbon in rice fields: evidence from a long-term fertilization experiment in subtropical China. *Journal of Soils Sediments* 13, 1327–1334. <https://doi10.1007/s11368-013-0741-z>.

Stevenson, F.J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. 2nd edition. John Wiley and Sons (eds.) Nueva York, 380 p.

Swift, R. S., 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.*, 166, 858-871.

Tate, K., Scott, N., Parshotam, A., Brown, L., Wilde, R., Giltrap, D., Trustrum, N., Gomez, B., Ross, D. (2000). A multi-scale analysis of a terrestrial carbon budget. Is New Zealand a source or sink of carbon? *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 82, 229–246.

Tiessen, H. J., J.W.B. Stewart. (1994). Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: II cultivation effects on organic matter composition in size fractions, *Soil Sci. soc. Am. J.* 509-514 p.

Vargas, L. y Varela, A. (2007). Producción de hojarasca de un bosque de niebla en la Reserva Natural La Planada (Nariño, Colombia). *Revista Universitas Scientarium*. 12, 49 – 56.

Valenzuela, I., Camarón, F., Visconti, E. (2015). Efecto del uso y manejo sobre las propiedades físicas de un suelo bajo dos sistemas de cultivo en el distrito de riego del río Zulia, Norte de Santander. *Revista Suelos Ecuatoriales*. 45, 41 – 47.

Valenzuela B., I.G.; Visconti M., E.F. (2018). Influencia del clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico en dos pisos altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista colombiana de ciencias hortícolas*. Vol. 12, No. 1. 233 – 243. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7349>

Valenzuela-Balcázar, I.G.; Visconti-Moreno, E.F.; Faz, Á.; Acosta, J.A. (2022). Soil Organic Carbon Dynamics in Two Rice Cultivation Systems Compared to an Agroforestry Cultivation System. *Agronomy* 12 (1), 17. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010017>

Van der Marel, H.W., Beutelspacher, H. (1976). Clay and related minerals. In: Van der Marel, H.W., Beutelspacher, H (Eds), *Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and Their Admixtures*. Elsevier Scientific: Amsterdam, 396 p.

Visconti-Moreno, E.F; Valenzuela-Balcázar, I.G. (2019). Impact of soil use on aggregate stability and its relationship with soil organic carbon at two different altitudes in the Colombian Andes. *Agronomía Colombiana*. 37, 263 – 273.
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n3.77601>

Von Lützow, M., Kögel-Knabner, L., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*, 57: 426-445.

Wall, D. H., Nielson, U. N., Six, J. (2015). Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528: 69-76.

Wolf, S. Eugster, W., Potvin, C., Turner, B., Buchmann, N. (2011). Carbon sequestration potential of tropical pasture compared with afforestation in Panama. *Global Change Biology* 17, 2763 – 2780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02460.x>

Yang H., Mouazen A. (2012). Vis/Near- and Mid- Infrared Spectroscopy for Predicting Soil N and C at a Farm Scale. *Infrared Spectroscopy – Life and Biomedical Sciences*.

Yan, S., Song, J., Fan, J., Yan, C., Dong, S., Ma, C., Gong, Z. (2020). Changes in soil organic carbon fractions and microbial community under rice straw return in Northeast China. *Global Ecology and Conservation*. 22, e00962.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00962>

Yu H, Ding W, Luo J, Geng R, Ghani A, Cai Z. (2012). Effects of long-term compost and fertilizer application on stability of aggregate associated organic carbon in an intensively cultivated sandy loam soil. *Biol Fertil Soils* 48:325–336



Yu Y, Guo Z, Wu H, Kahmann JA, Oldfield F. (2009). Spatial changes in soil organic carbon density and storage of cultivated soils in China from 1980 to 2000. *Glob Biogeochem Cycles* 23, GB 2021. <https://doi.org/10.1029/2008GB003428>

Zornoza, R., Acosta, J., Gabarrón, M., Gómez-Garrido, M., Sánchez-Navarro, V., Terrero, A., Martínez-Martínez, S., Faz, A., Pérez-Pastor, A. (2018). Greenhouse gas emissions and soil organic matter dynamics in woody crop orchards with different irrigation regimes. *Science of the Total Environment* 644, 1429–1438. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.398>



9. ANEXOS

Anexo 1. Contribuciones derivadas de esta investigación

agronomy MDPI

Article
Soil Organic Carbon Dynamics in Two Rice Cultivation Systems Compared to an Agroforestry Cultivation System

Ibonne Geaneth Valenzuela-Balcázar ^{1,2,*}, Efraín Francisco Visconti-Moreno ^{1,3}, Ángel Faz ² and José A. Acosta ²

¹ Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, Universidad Francisco de Paula Santander, Av. Gran Colombia No. 12E-96 Barrio Colón, 540001 San José de Cúcuta, Colombia; efv@unfrancisco.depaula.edu.co
² Sustainable Use, Management and Reclamation of Soil and Water Research Group, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30202 Cartagena, Spain; angel.faz@upct.es (A.F.); j.acosta@upct.es (J.A.A.)
³ Correspondence: ibonneg@unfrancisco.depaula.edu.co

Abstract: After changes in tillage on croplands, it is necessary to assess the effects on soil organic carbon (SOC) dynamics in order to identify if soil is a sink or emitter of carbon to the atmosphere. This study was conducted in two plots of rice cultivation, where tillage and water management changes occurred. A third plot of native forest with Cecropia trees was used as reference soil (agroforestry). For SOC balance estimation, measurement of organic carbon (OC) inputs was determined from necromass, roots, microbial biomass, and urea applications. CO₂ and CH₄ emissions were also measured. Results showed that the change in the use of irrigation and tillage in rice cultivation did not cause significant differences in OC inputs to soil or in outputs due to carbon emissions. Furthermore, it was found that both irrigation and tillage management systems in rice cultivation compared with agroforestry were management systems with a negative difference between OC inputs and outputs due to CO₂ emissions associated with intense stimulation of crop root respiration and microbial activity. The comparison of SOC dynamics between the agroforestry system and rice cultivation systems showed that an agroforestry system is a carbon sink with a positive OC dynamic.

Keywords: carbon sequestration; greenhouse gas emissions; soil degradation; sustainable agriculture

1. Introduction
 Soil constituents such as clay, humus, and microorganisms are the most important components for terrestrial ecosystems due to its multiple ecosystem services. The ability of soil to fulfill its functions depends on its physical, chemical, and biological properties [1,2]. Intensive agricultural use of soils threatens productivity and ecosystem functionality mainly due to a decrease in soil organic carbon (SOC) content [3,4] caused by a decrease in the contributions of organic residues and an increase in gas emissions [5–10]. According to Smith and collaborators in 2018, agricultural soils changes in SOC are determined by the cumulative contributions of organic carbon (OC) from the crop, and when there are high returns driven by nitrogenous fertilizers and the fallow frequency is low, it can favor an increase in SOC [11]. Nevertheless, this is a complex and dynamic process. In 2013, Salnikow and collaborators pointed out that 55 to 70% of the carbon in organic residues reaching the soil is lost due to gaseous emissions into the atmosphere, and 5 to 15% is incorporated to the microbial biomass of the soil [12]. The balance between inputs and outputs of organic carbon in the soil constitutes an assessment methodology to identify its functioning as a sink or as a carbon emitter in the ecosystem, allowing the evaluation and comparison of the dynamics of organic carbon in soils under different use and management systems [12,13].
 In 2010, Lal has pointed that in intensive cultivation, cropland soils contain 25 to 75% less SOC than their counterparts in undisturbed or natural ecosystems [14]. However, soils with long-term rice cropping can significantly increase SOC stock [15]; this accumulation

Citation: Valenzuela-Balcázar, I.G.; Visconti-Moreno, E.F.; Faz, A.; Acosta, J.A. Soil Organic Carbon Dynamics in Two Rice Cultivation Systems Compared to an Agroforestry Cultivation System. *Agronomy* **2022**, *12*, 17. <https://doi.org/10.3390/agronomy1209017>

Academic Editor: Emanuele Leggeri

Received: 30 November 2021
Accepted: 28 December 2021
Published: 23 December 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Agronomy **2022**, *12*, 17. <https://doi.org/10.3390/agronomy1209017> <https://www.mdpi.com/journal/agronomy>

**LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
CÚCUTA Y SECCIONAL OCAÑA**

CERTIFICA QUE:

IBONNE GEANETH VALENZUELA BALCÁZAR
C.C. 40400273

Participó como **PONENTE** en modalidad **ORAL** en el evento **7th INTERNATIONAL WEEK OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION** que se desarrolló del 06 al 09 de octubre del año 2020 en San José de Cúcuta, Norte de Santander Colombia, con el tema **"IMPACTO DEL USO Y MANEJO SOBRE EL CARBONO ORGANICO EN UN SUELO AGRICOLA DE NORTE DE SANTANDER COLOMBIA"**.

IVAN PARDO S.
VICERRECTOR ASISTENTE DE INVESTIGACIÓN
UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA
SANTANDER

TERESITA VELÁZQUEZ PICO
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
OCAÑA




III SEMANA INTERNACIONAL
XI SEMANA DE CIENCIA, TECNOLOGÍA
E INNOVACIÓN

La Universidad Francisco de Paula Santander

CERTIFICA QUE:
IBONNE GEANETH VALENZUELA BALCAZAR
C.C. 40.400.273

Participó en modalidad de **PONENTE** en la **III SEMANA INTERNACIONAL XI SEMANA DE CIENCIA TECNOLOGIA E INNOVACIÓN** que se desarrolló los días 25, 26, 27 y 28 de Octubre de 2016 en la Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, con la ponencia titulada "Emisiones de gas metano (CH4) en dos tipos de uso del suelo en el distrito de riego del río Zulia".

[Signature]
OLIVERA MARINA VEGA ANGARITA
Vicerrectora Académica

[Signature]
JORGE SANCHEZ MOLINA
Vicerrector Asistente de Investigación y Extensión



II SEMANA INTERNACIONAL
X SEMANA DE CIENCIA, TECNOLOGÍA
E INNOVACIÓN - 2015

La Universidad Francisco de Paula Santander
Vicerrectoría Asistente de Investigación y Extensión

CERTIFICA QUE:
IBONNE GEANETH VALENZUELA BALCAZAR
C.C. 40.400.273

Participó como **PONENTE** en Modalidad Oral, en la **II SEMANA INTERNACIONAL, X SEMANA DE CIENCIA TECNOLOGIA E INNOVACIÓN** que se desarrolló del 20 al 23 de Octubre de 2015 en la Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, con el tema "**EFFECTO DEL USO Y MANEJO SOBRE LA RESPIRACIÓN EDAFICA Y BIOMASA MICROBIAL DE UN SUELO DEL DISTRITO DE RIEGO DEL RIO ZULIA**".

[Signature]
JESÚS ERNESTO URBINA CÁRDENAS
Vicerrector Académico

[Signature]
JORGE SANCHEZ MOLINA
Vicerrector Asistente de Investigación y Extensión (E)




EFEECTO DEL USO Y MANEJO SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DEL CARBONO ORGANICO EN EL PERFIL DE UN SUELO EN DOS SISTEMAS AGRICOLAS COLOMBIA

Autores:
Valenzuela B., Ibonne G.¹, Velasco Miguel², Visconti M., Efraín³, Gélvez Rafael⁴, Camarón Franyer⁵ y Barbosa Alexandro³

Resumen

El estudio de la distribución del COS en el perfil de un suelo de orden Entisol en dos sistemas de cultivo: un monocultivo de arroz y un sistema agroforestal (Bosque con cacao) que se han mantenido con el mismo uso desde hace más de 40 años, en el sector del Distrito de riego del Río Zulia en Norte de Santander, tuvo como fin conocer el comportamiento del contenido del COS en el perfil en cada sistema agrícola y detectar como las prácticas de uso y manejo están afectando esta variable.

El trabajo consistió en una investigación de campo con diseño experimental factorial aleatorio de tres factores (Uso del suelo, Profundidad del suelo y Etapa del Cultivo) y tres repeticiones.

El análisis estadístico de los resultados demostró un efecto significativo de cada factor sobre el contenido de COS, resultando muy relevante que el contenido de COS expresado en términos de proporción (%) es significativamente mayor en el sistema agroforestal del Bosque con cacao y mayor en el horizonte superficial (0 - 10 cm). Se encontró que los factores con efecto muy significativo son la profundidad del suelo y la interacción entre el tipo de uso del suelo y la etapa del cultivo, observándose que el COS expresado en Kg/ha no es distinto entre los sistemas de uso del suelo, pero si es significativamente mayor en el horizonte superficial.

¹Docente investigador. Universidad Francisco de Paula Santander-UFPS. Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente. Grupo de investigación Ambiente y Vida- GIAV.
²Estudiantes de Ingeniería Ambiental UFPS.
³Docentes investigadores. Departamento de Ingeniería Agronómica UNET. ibonneganethvb@ufps.edu.co, ivalenbal@hotmail.com

Anexo 2. Análisis estadísticos

Estadísticos descriptivos: COS; CIC; pH; C.E. (μ S); T °C; ... Hum Muestra

Variable	Depth	Conteo		Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría
		total								
COS	1	90		2,9887	0,7979	26,70	1,3200	2,9500	6,9900	1,86
	2	90		2,1588	0,5547	25,70	1,1700	2,0600	3,8700	0,91
	3	90		1,8079	0,4411	24,40	0,9600	1,7400	3,5500	0,79
CIC	1	90		11,813	3,290	27,85	4,000	12,000	20,400	-0,19
	2	90		7,618	2,470	32,42	2,800	8,000	15,200	0,42
	3	90		9,704	2,634	27,14	2,000	10,000	15,600	-0,50
pH	1	90		5,3378	0,4385	8,21	4,4000	5,3000	6,2000	-0,02
	2	90		5,7089	0,5286	9,26	4,4000	5,6500	6,9000	0,23
	3	90		5,8767	0,5145	8,76	4,4000	5,9000	7,0000	-0,17
C.E. (μ S)	1	90		98,07	47,25	48,18	32,10	92,30	286,00	1,66



	2	90	80,31	41,26	51,38	11,40	71,50	194,40	0,80
	3	90	74,16	48,68	65,64	19,60	57,55	368,00	2,94
T °C	1	90	26,867	2,038	7,59	23,200	27,500	30,200	-0,15
	2	90	26,747	3,075	11,50	5,700	28,000	30,300	-3,63
	3	90	26,571	2,239	8,43	22,700	26,250	30,500	0,05
Da	1	90	1,2512	0,1358	10,85	0,8500	1,2508	1,5504	-0,25
	2	90	1,4470	0,1211	8,37	0,9824	1,4596	1,7115	-0,82
	3	90	1,4744	0,1131	7,67	1,2075	1,4762	1,6947	-0,26
Porosidad	1	90	47,963	4,451	9,28	39,663	47,337	59,731	0,55
	2	90	44,581	4,482	10,05	32,783	44,629	56,520	-0,25
	3	90	42,426	4,993	11,77	31,996	41,917	59,859	0,41
Hum(-33kPa)	1	90	39,997	3,838	9,59	30,160	40,299	47,476	-0,70
	2	90	35,583	4,287	12,05	26,378	35,865	45,372	-0,19
	3	90	33,600	4,359	12,97	23,148	33,441	42,192	-0,14
Hum Muestra	1	90	38,257	5,877	15,36	23,397	37,180	55,700	0,37
	2	90	30,391	4,842	15,93	18,090	30,067	46,323	0,17
	3	90	29,449	5,782	19,63	10,151	28,993	54,085	0,86
<u>Variable</u>	<u>Depth</u>		<u>Curtosis</u>						
COS	1		7,86						
	2		0,65						
	3		1,53						
CIC	1		-0,02						
	2		0,41						
	3		-0,10						
pH	1		-0,53						
	2		-0,08						
	3		-0,25						



C.E. (μS)	1	4,00
	2	-0,12
	3	14,12
T °C	1	-1,53
	2	23,61
	3	-1,60
Da	1	0,35
	2	1,97
	3	-0,46
Porosidad	1	-0,11
	2	0,27
	3	0,57
Hum(-33kPa)	1	0,33
	2	-0,61
	3	-0,10
Hum Muestra	1	0,55
	2	1,07
	3	4,14

Estadísticos descriptivos: COS; CIC; pH; C.E. (μS); T °C; ... Hum Muestra
Resultados de Soil Use = 1

Variable	Depth	Conteo total	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría
COS	1	30	2,8413	0,4329	15,24	1,6900	2,9500	3,5800	-0,53



	2	30	2,2290	0,4990	22,39	1,5100	2,1100	3,5500	0,74
	3	30	1,8813	0,4947	26,29	1,1400	1,7700	3,5500	1,39
CIC	1	30	9,947	3,147	31,64	4,000	10,800	16,000	-0,06
	2	30	7,233	2,230	30,82	3,200	7,700	12,000	-0,19
	3	30	8,747	3,119	35,66	2,000	8,600	15,600	0,12
pH	1	30	5,2700	0,3706	7,03	4,4000	5,2500	6,2000	0,02
	2	30	5,670	0,600	10,58	4,400	5,500	6,900	0,48
	3	30	5,8967	0,5449	9,24	5,1000	5,9000	7,0000	0,18
C.E. (μS)	1	30	93,88	30,52	32,51	49,90	94,30	170,90	0,64
	2	30	81,85	35,03	42,80	35,80	74,25	161,30	0,67
	3	30	82,8	60,6	73,23	29,5	63,8	368,0	3,82
T °C	1	30	27,006	1,792	6,64	24,300	27,387	29,300	-0,32
	2	30	27,187	1,878	6,91	24,000	28,200	29,500	-0,35
	3	30	26,967	2,120	7,86	24,000	27,350	30,000	-0,09
Da	1	30	1,2769	0,0966	7,56	1,0643	1,2659	1,4700	0,08
	2	30	1,4901	0,1138	7,64	1,1978	1,4984	1,7115	-0,77
	3	30	1,5287	0,1034	6,76	1,2202	1,5336	1,6947	-0,75
Porosidad	1	30	46,482	4,395	9,46	39,663	45,150	59,731	1,34
	2	30	42,832	3,918	9,15	35,407	42,989	51,502	0,06
	3	30	40,069	5,007	12,50	31,996	39,522	51,189	0,47
Hum(-33kPa)	1	30	38,814	3,533	9,10	30,160	39,731	43,754	-1,22
	2	30	35,398	3,870	10,93	29,437	36,005	45,372	0,29
	3	30	31,433	3,196	10,17	27,366	30,161	41,379	1,21
Hum Muestra	1	30	36,356	4,489	12,35	23,397	36,673	47,583	-0,12
	2	30	29,189	4,175	14,30	20,752	28,788	42,998	1,07
	3	30	27,443	3,960	14,43	21,322	27,168	34,344	0,19

Variable Depth Curtosis

COS 1 0,51



	2	0,26
	3	3,36
CIC	1	-0,72
	2	-0,50
	3	-0,19
pH	1	0,70
	2	0,22
	3	-0,84
C.E. (μ S)	1	0,14
	2	-0,52
	3	17,57
T °C	1	-1,41
	2	-1,48
	3	-1,78
Da	1	-0,18
	2	1,23
	3	1,18
Porosidad	1	2,33
	2	-0,17
	3	-0,13
Hum(-33kPa)	1	1,09
	2	-0,15
	3	1,73
Hum Muestra	1	2,18



2 3,15

3 -1,15

Resultados de Soil Use = 2

Variable	Depth	Conteo total	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría
COS	1	30	2,791	0,617	22,11	1,320	2,845	4,080	-0,54
	2	30	2,0753	0,5235	25,23	1,1700	2,0450	3,5000	0,62
	3	30	1,6013	0,3812	23,81	0,9600	1,5600	2,6900	1,02
CIC	1	30	11,733	2,587	22,05	5,600	12,000	15,600	-0,66
	2	30	7,053	2,600	36,86	2,800	6,600	13,200	0,65
	3	30	9,820	2,185	22,25	4,000	10,000	12,400	-1,07
pH	1	30	5,1567	0,3664	7,11	4,5000	5,1000	5,9000	0,01
	2	30	5,8567	0,5117	8,74	5,0000	5,9000	6,8000	0,25
	3	30	6,1400	0,4523	7,37	5,0000	6,3000	6,8000	-0,84
C.E. (μS)	1	30	79,30	27,83	35,09	40,00	83,20	139,20	0,35
	2	30	82,15	45,32	55,17	30,20	70,10	182,50	0,84
	3	30	67,60	41,40	61,25	25,80	50,45	181,70	1,41
T °C	1	30	26,927	2,030	7,54	23,200	27,850	30,000	-0,20
	2	30	27,063	2,131	7,88	23,500	28,100	30,300	-0,39
	3	30	26,743	2,302	8,61	23,500	27,750	30,500	-0,13
Da	1	30	1,3150	0,1224	9,31	1,0217	1,2827	1,5504	0,20
	2	30	1,4971	0,0813	5,43	1,2878	1,4958	1,7087	0,00
	3	30	1,5076	0,0975	6,47	1,2959	1,5238	1,6496	-0,62
Porosidad	1	30	47,350	4,062	8,58	40,627	47,317	55,163	0,18
	2	30	43,789	4,647	10,61	32,783	44,807	53,118	-0,72
	3	30	42,635	4,303	10,09	35,849	42,471	52,333	0,40
Hum(-33kPa)	1	30	38,814	4,093	10,55	30,511	39,628	44,818	-0,36



	2	30	34,431	4,651	13,51	26,378	34,860	42,508	-0,12
	3	30	32,307	4,456	13,79	23,148	32,784	39,383	-0,71
Hum Muestra	1	30	36,955	4,351	11,77	27,241	36,980	47,583	0,19
	2	30	28,407	3,997	14,07	18,255	29,182	35,064	-0,61
	3	30	28,39	6,95	24,48	10,15	27,86	54,09	1,24
Variable	Depth	Curtosis							
COS	1	0,82							
	2	0,78							
	3	1,39							
CIC	1	0,19							
	2	-0,01							
	3	0,79							
pH	1	-0,43							
	2	-0,94							
	3	-0,16							
C.E. (μ S)	1	-0,77							
	2	-0,37							
	3	1,29							
T °C	1	-1,49							
	2	-1,44							
	3	-1,56							
Da	1	0,13							
	2	1,42							
	3	-0,32							
Porosidad	1	-0,82							
	2	0,71							



	3	-0,63
Hum(-33kPa)	1	-0,60
	2	-0,60
	3	0,24
Hum Muestra	1	0,32
	2	0,29
	3	6,82

Resultados de Soil Use = 3

Variable	Depth	Conteo		Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría
		total	Media						
COS	1	30	3,334	1,095	32,85	2,030	3,095	6,990	1,65
	2	30	2,172	0,639	29,43	1,380	1,970	3,870	1,22
	3	30	1,9410	0,3728	19,21	1,2200	1,9800	2,5600	-0,37
CIC	1	30	13,760	3,015	21,91	6,400	14,000	20,400	-0,17
	2	30	8,567	2,362	27,57	4,400	8,400	15,200	0,88
	3	30	10,547	2,257	21,40	6,400	11,200	14,400	-0,64
pH	1	30	5,5867	0,4644	8,31	4,5000	5,6500	6,2000	-0,81
	2	30	5,6000	0,4464	7,97	4,6000	5,6000	6,3000	-0,45
	3	30	5,5933	0,3947	7,06	4,4000	5,6000	6,4000	-1,13
C.E. (μS)	1	30	121,0	65,0	53,67	32,1	115,3	286,0	1,02
	2	30	76,94	43,89	57,05	11,40	70,55	194,40	0,89
	3	30	72,11	41,92	58,13	19,60	56,65	188,30	1,18
T °C	1	30	26,670	2,314	8,68	23,900	26,750	30,200	0,05
	2	30	25,990	4,479	17,23	5,700	25,650	30,200	-3,27
	3	30	26,003	2,251	8,66	22,700	24,900	30,000	0,43



Da	1	30	1,1617	0,1381	11,89	0,8500	1,1812	1,4368	-0,11
	2	30	1,3536	0,1090	8,05	0,9824	1,3839	1,4857	-1,68
	3	30	1,3870	0,0836	6,03	1,2075	1,4084	1,5574	-0,37
Porosidad	1	30	50,057	4,217	8,42	42,305	49,355	58,956	0,40
	2	30	47,121	3,771	8,00	41,098	47,701	56,520	0,20
	3	30	44,576	4,726	10,60	35,859	43,791	59,859	0,94
Hum(-33kPa)	1	30	42,364	2,697	6,37	37,533	43,207	47,476	-0,23
	2	30	36,920	4,068	11,02	28,301	37,958	42,288	-0,54
	3	30	37,061	3,041	8,21	32,752	37,559	42,192	0,19
Hum Muestra	1	30	41,46	7,13	17,19	26,28	42,32	55,70	-0,31
	2	30	33,577	4,743	14,12	18,090	34,127	46,323	-0,60
	3	30	32,510	4,859	14,95	26,276	31,034	45,705	1,05

Variable	Depth	Curtosis
COS	1	3,72
	2	0,77
	3	-0,71
CIC	1	0,73
	2	1,64
	3	-0,46
pH	1	0,05
	2	-0,35
	3	2,52
C.E. (μ S)	1	0,76
	2	0,39
	3	0,85
T °C	1	-1,78



	2	14,72
	3	-1,43
Da	1	-0,23
	2	3,72
	3	-0,13
Porosidad	1	-0,50
	2	-0,27
	3	2,43
Hum(-33kPa)	1	-0,53
	2	-0,75
	3	-1,08
Hum Muestra	1	0,03
	2	4,03
	3	0,48

Pruebas de Múltiple Rangos para COS por Soil Use

Método: 95,0 porcentaje LSD

Soil Use	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	90	2,15589	0,0602213	X
1	90	2,31722	0,0602213	XX
3	90	2,48222	0,0602213	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2		0,161333	0,168052
1 - 3		-0,165	0,168052
2 - 3	*	-0,326333	0,168052

* indica una diferencia significativa.

Correlación: COS; CIC; pH; C.E. (μ S); T °C; Da; Porosidad; ... Muestra

	COS	CIC	pH	C.E. (μ S)	T °C	Da
CIC	0,343					
	0,000					



pH	-0,331	-0,027				
	0,000	0,653				
C.E. (μ S)	0,225	0,223	0,006			
	0,000	0,000	0,922			
T °C	-0,153	0,178	0,254	0,171		
	0,012	0,003	0,000	0,005		
Da	-0,466	-0,383	0,215	-0,169	0,005	
	0,000	0,000	0,000	0,005	0,935	
Porosidad	0,309	0,277	-0,205	0,056	-0,005	-0,524
	0,000	0,000	0,001	0,358	0,932	0,000
Hum(-33kPa)	0,380	0,245	-0,271	0,173	0,016	-0,471
	0,000	0,000	0,000	0,004	0,793	0,000
Hum Muestra	0,413	0,394	-0,248	0,082	-0,062	-0,737
	0,000	0,000	0,000	0,179	0,313	0,000

	Porosidad	Hum(-33kPa)
Hum(-33kPa)	0,450	
	0,000	
Hum Muestra	0,722	0,459
	0,000	0,000

Contenido de la celda

Correlación de Pearson

Valor p

PCA Scores DRIFT Au Transf

	PC-1	PC-2	PC-3
1, Fri Jun 08 09:44:57 2018			
1 (GMT+02:00)	1 -0,261137	0,5522386	0,2287107
10, Fri Jun 08 12:41:36 2018			0,0337454
10 (GMT+02:00)	2 -1,017635	-0,637558	6
11, Fri Jun 08 12:54:01 2018			
11 (GMT+02:00)	3 0,1109114	-0,9021928	0,2515569
			-
12, Fri Jun 08 13:03:55 2018		0,0136764	0,0061224
12 (GMT+02:00)	4 -1,014994	7	2
13, Fri Jun 08 13:17:01 2018		0,0694648	0,0889891
13 (GMT+02:00)	5 -1,754491	3	6
14, Fri Jun 08 13:28:19 2018			
14 (GMT+02:00)	6 0,8719835	-0,2176178	0,5349004
15 15, Fri Jun 08 13:45:17 2018	7 -0,1125116	0,1619501	-1,116675



16, Fri Jun 08 13:55:05 2018			0,0252800	
16 (GMT+02:00)	8	-1,354382	1	-0,3282344
17, Fri Jun 08 14:06:28 2018				0,0477332
17 (GMT+02:00)	9	-1,378863	0,1028697	7
18, Fri Jun 08 14:16:12 2018				0,0149475
18 (GMT+02:00)	10	0,4958319	-0,8832587	9
2, Fri Jun 08 10:10:07 2018				
2 (GMT+02:00)	11	-0,9370625	0,6444321	-0,1367795
			-	
3, Fri Jun 08 10:43:58 2018			0,0006303	
3 (GMT+02:00)	12		4	0,4157633
4, Fri Jun 08 10:59:32 2018				0,6634578
4 (GMT+02:00)	13	2,794289	1,460725	0,0069106
				2
				-
5, Fri Jun 08 11:19:59 2018			0,0359491	0,0751169
5 (GMT+02:00)	14	-0,1305721	7	2
6, Fri Jun 08 11:31:01 2018				
6 (GMT+02:00)	15	2,166515	-0,4588849	0,1457798
7, Fri Jun 08 11:55:31 2018			0,0778219	0,0258215
7 (GMT+02:00)	16		8	9
8, Fri Jun 08 12:09:36 2018				0,574349
8 (GMT+02:00)	17	2,864335	-0,5827703	-0,6073921
9, Fri Jun 08 12:31:05 2018				
9 (GMT+02:00)	18	-1,419409	0,2014648	-0,3330049