

EVALUACIÓN DEL PROTOCOLO DE MANEJO SOSTENIBLE DEL SUELO (FAO) EN TRES CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE COSTA RICA

Carlomagno Salazar Calvo¹, Carlos Mauricio Rojas Navarro²

RESUMEN

Evaluación del protocolo de manejo sostenible del suelo (FAO) en tres cuencas hidrográficas de Costa Rica. En el año 2022 se realizó una evaluación del Protocolo de Manejo Sostenible del Suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (PMSS-FAO). Del mencionado protocolo se evaluaron cuatro variables como las más importantes: Densidad Aparente (pa), contenido de Carbono Orgánico en % (COS), Productividad del Suelo y Actividad Biológica en tres diferentes cuencas hidrográficas de Costa Rica, cuenca del río Jesús María, Grande de Tárcoles y Barranca. Se evaluó el PMSS en seis fincas ganaderas y diez fincas dedicadas a la producción de café. Además, de los indicadores macro mencionados, se evaluaron otros parámetros como la fertilidad disponible por medio de un análisis químico completo de suelos, la capacidad de uso de las tierras agroecológicas, análisis bromatológicos en las fincas ganaderas y en el parámetro de Actividad Biológica se evaluó la respiración microbiana (mg C-CO₂/kg de suelo.día), la masa microbiana (mg C/kg suelo), y como indicador adicional se midió la meso y macrofauna del suelo por medio de la técnica Biolog-Ecoplatos para la Diversidad Funcional, y con ello obtener el índice de Shannon Weaver (H) para evaluar un indicador de la biodiversidad edáfica. En la primera fase del estudio, se encuestó a los productores, para identificar las prácticas de manejo sostenible de suelos y aguas (PMSSA) que tenían en sus fincas y determinar desde cuando se aplican. También, se realizó el escaneo del cumplimiento de las Directrices Voluntarias para la Gestión Sostenible de los Suelos (DVGSS) (FAO, 2017). Las cuencas estudiadas han sido degradadas por más de cien años por malas prácticas agrícolas de manejo y conservación de suelos. Cambiar la situación anterior, conlleva altos costos de inversión y la recuperación de suelos es lenta, sin embargo, los productores participantes de la investigación optaron por adoptar estas PMSSA. De la investigación se deduce que sólo dos fincas cumplieron con las DVGSS, el 80 % de las fincas de café presentaron un cumplimiento medio de las DVGSS, y las fincas ganaderas cumplen en un 50 %.

Palabras clave: Densidad aparente, productividad, actividad biológica, carbono orgánico, suelos.

1. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA-Costa Rica. csalazar@inta.go.cr.
2. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA-Costa Rica. crojasn@inta.go.cr.

ABSTRACT

Evaluation of the FAO Sustainable Soil Management Protocol in three watersheds of Costa Rica.

An evaluation of the Sustainable Soil Management Protocol of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (PMSS-FAO by its initials in Spanish) was conducted in 2022. From the mentioned protocol, four variables were evaluated as the most important: Bulk Density (ρ_b), Organic Carbon Content in % (COS), Soil Productivity, and Biological Activity in three different watersheds of Costa Rica, Jesus Maria River, Grande de Tárcoles and Barranca. The PMSS was evaluated in six cattle farms and ten coffee farms. In addition to the macro indicators mentioned above, other parameters were evaluated, such as available fertility by means of a complete chemical analysis of soils, the capacity of agro-ecological land use, bromatological analysis in livestock farms, and the Biological Activity parameter, Microbial Respiration ($\text{mg C-CO}_2/\text{kg soil.day}$), microbial mass (mg C/kg soil), and as an additional indicator, soil mesofauna and macrofauna were measured Biolog-Ecoplato technique for Functional Diversity, to obtain the Shannon Weaver index (H) to evaluate an indicator of soil biodiversity. In the first phase of the study, producers were surveyed to identify the sustainable soil and water management practices (PMSSA by its initials in Spanish) they had on their farms and to determine how long they had been applied it. Also, a scan of compliance with the Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management (FAO 2017). The studied watersheds for over one hundred years due to poor agricultural practices in soil management and conservation. Changing the previous situation involves high investment costs, and soil recovery is slow, however, the producers participating in the research chose to adopt these PMSSA. From the research it is deduced that only two farms complied with the DVGSS, 80 % of the coffee farms showed medium compliance with the DVGSS, and de livestock farms comply with 50 %.

Keywords: Bulk density, productivity, biological activity, organic carbon, soils.

INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra exhibe en la actualidad una serie de problemas globales que ejercen presión sobre los recursos naturales que son la base de nuestro diario interactuar. Así, la expansión urbana, el cambio climático, la pobreza, la inseguridad alimentaria, la sequía, la pérdida de biodiversidad, la degradación de las tierras, la contaminación, la migración de las poblaciones y las pandemias, son ejemplos de esta problemática que hay que solucionar, si se desea el desarrollo sostenible de las poblaciones humanas.

En este contexto, es muy importante valorar el papel de los suelos en los servicios ecosistémicos que proveen y que permiten la resiliencia de la vida en la Tierra.

La importancia del Manejo Sostenible de los Suelos (MSS) para la FAO, recae en garantizar que los suelos se manejen de manera sostenible y que los suelos degradados se rehabiliten o se restauren.

Con base en lo anterior, nace el Protocolo de Manejo Sostenible del Suelo (PMSS), para identificar si las prácticas de manejo utilizadas por los productores están en concordancia con la gestión sostenible del suelo, lo cual, se definió por medio del Convenio de las Directrices Voluntarias de la Gestión Sostenible del Suelo (DVGSS) (FAO-ITPS, 2015).

Este protocolo proporciona indicadores clave y un conjunto de herramientas para evaluar las funciones del suelo versus sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Además, el protocolo pretende una evaluación de la capacidad de un suelo para mantener servicios ecosistémico priorizados y así, mejorar la calidad de vida de los productores, la productividad y la rentabilidad de manera sostenible. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue Validar el Protocolo de Manejo Sostenible del Suelo en tres cuencas de Costa Rica: río Jesús María, río Grande de Tárcoles y río Barranca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde al Pacífico Central de Costa Rica, específicamente el estudio se localizó en tres diferentes cuencas hidrográficas de Costa Rica: río Jesús María (7 fincas), río Barranca (1 finca), río Grande de Tárcoles (8 fincas), que a su vez pertenecen a cuatro cantones de la provincia de Alajuela: San Ramón, Palmares, San Mateo y Atenas. El proyecto tiene influencia indirecta en 270,2 ha que componen el área total

de las 16 fincas evaluadas y directamente sobre 16 ha de las mismas fincas, ya que se evaluó una ha de cada finca por productor participante, no obstante, las 16 fincas evaluadas eran manejadas de manera agroconservacionista en su totalidad.

El área se enmarca dentro de las coordenadas métricas 1.050.000-1.120.000 y 430.000-455.000 de la proyección CRTM-05 (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de las fincas y puntos de muestreo de las 16 fincas evaluadas en las cuencas del río Jesús María, Barranca y Grande de Tárcoles, setiembre de 2023.

Primera fase

Por medio de una encuesta realizada a los productores, y con base en el Protocolo de Manejo Sostenible de Suelos y Aguas (PMSSA) se caracterizaron cada una de las 16 fincas pilotos (6 de ganadería y 10 de café) y de esta manera validar dicho protocolo (FAO-ITPS, 2020). La encuesta contemplaba diferentes parámetros, dentro de los que se destacaban, el área, uso de la tierra, capacidad de uso de las mismas, y la ubicación geográfica y política de cada predio. En cada

finca, se realizó un cateo de suelos, que consiste en una observación simple con barreno Edelman (tipo holandés) para determinar la Capacidad de Uso de las Tierras (Decreto Ejecutivo No. 41960 MAG-MINAE, 2019). Así, la encuesta permitió evaluar el cumplimiento de las Directrices Voluntarias para la Gestión Sostenible de los Suelos en cada finca de la investigación (DVGSS) (FAO, 2017).

Indicadores medidos

Los indicadores medidos en cada una de las fincas pilotos fueron los recomendados por el Protocolo de Evaluación del Manejo Sostenible de Suelos (FAO-ITPS, 2020) como obligatorios: Productividad del suelo, Porcentaje de Carbono Orgánico, Densidad Aparente y Actividad Biológica del suelo. Como indicador adicional se midió la meso y macrofauna del suelo por medio de la técnica Biolog-Ecoplatos para la Diversidad Funcional, y de esta manera evaluar un indicador de la biodiversidad edáfica. Todos los indicadores evaluados se realizaron en la época lluviosa de Costa Rica, en el mes de agosto.

Muestreo

El diseño de muestreo en las áreas homogéneas, más representativas del relieve de las fincas, se realizó por medio de una muestra compuesta, recolectada en cinco puntos de muestreo con dos repeticiones por punto y separadas unas de otras por 10 m (Figura 2).

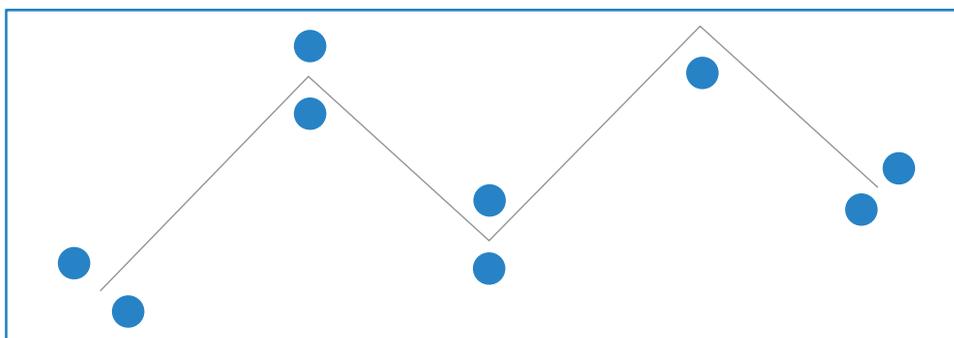


Figura 2. Esquema de los puntos de muestreo, espaciados 10 m, con dos repeticiones, para un total de 10 submuestras. INTA. Agosto, 2022.

Cada unidad de muestreo contempla una superficie de una ha. Se tomó una muestra compuesta por área homogénea. Para la Densidad Aparente se tomó una muestra por finca, debido a la falta de presupuesto para ampliar el número de muestras.

La productividad del suelo en fincas de café, se realizó por medio de la producción de café en cereza y como unidad de medida la cantidad de fanegas/ha. Una fanega de café en fresco es igual a 258 kg aproximadamente, lo que sería alrededor de 46 kg de café oro (ya procesado y seco).

Para las fincas ganaderas, la productividad del suelo, se midió bajo la técnica del Botanal® (Franco, 2005) para determinar producción

de biomasa, además se tomó una muestra compuesta de pasto, según la variedad encontrada en cada finca, la cual se transportó en bolsas de papel selladas y previamente identificadas con la variedad de pasto, edad fenológica y la identificación de la finca. La muestra se toma, de tal manera que se asemeje al comportamiento del animal cuando ingiere la planta. Con las muestras de pasturas se realizaron los análisis bromatológicos tanto de la fracción proximal (proteína cruda, materia seca) como la fracción Van Soest (fibra detergente neutra, fibra detergente ácida y digestibilidad in vitro de la materia seca), dichos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de piensos y forrajes del INTA, para determinar la calidad nutricional de los pastos evaluados.

Segunda fase

La metodología para la segunda fase del proyecto abarcó los siguientes pasos:

Paso 1: una vez que se estaba en la finca a muestrear, con ayuda de un recipiente (balde) y un barreno Edelman, se tomaron las submuestras de suelo a 20 cm de profundidad y se depositaron en el balde, teniendo cuidado en todo momento de no tocar las submuestras con la mano, para no contaminar las mismas con exudados producto del sudor del técnico. En la hectárea seleccionada de la finca y debidamente georeferenciada, se tomó un mínimo entre 14 a 15 submuestras, en forma de zigzag, evitando trillos, excrementos de animales, realizarla debajo de una cerca, o donde se haya quemado, luego se realizó un cuarteo sobre un cartón limpio (Figura 3), y se seleccionaron dos muestras de suelo de aproximadamente un kg de peso, una dirigida al laboratorio de suelos del INTA, para el análisis químico completo + carbono orgánico y la otra dirigida bajo refrigeración al laboratorio de Microbiología del CIA-UCR para los análisis de actividad biológica.

El análisis químico completo se realizó mediante la solución extractora Olsen Modificado, (NaHCO_3 0.5 N, EDTA 0.01 N y el floculante "Superfloc" ajustado a pH 8,5 con NaOH) fertilidad disponible: P-K-Fe-Cu-Zn-Mn, Ca-Mg-Al: solución extractora de KCl 1 N y relación suelo-solución 1:10. La acidez intercambiable bajo el método Peech et al. (1947) con Cloruro de potasio 1N. El pH en H_2O : potenciométricamente, en relación suelo: agua 1:2,5. La Materia Orgánica bajo el método de Walkley y Black (1938) que consiste en combustión húmeda con dicromato de potasio, al dato total de carbono reportado se le aplica el 58 % y se obtiene el Carbono Orgánico. Con lo anterior, se cumple con un Indicador Macro del Protocolo Manejo Sostenible del Suelo, que es el contenido de Carbono Orgánico en porcentaje.



Figura 3. Ilustración del cuarteo de la muestra de suelos. INTA. Agosto, 2022.

Paso 2: en cuanto al indicador macro de Actividad Biológica, se midieron tres parámetros: Respiración, Masa Microbiana y Diversidad Funcional, seguidamente se explican los pasos para determinar cada uno de ellos.

La Respiración Microbiana del suelo, se determinó de acuerdo con la metodología de Anderson (1982), se pesó en beakers 10 g de suelo por triplicado, la muestra se colocó en una jarra de incubación junto con un recipiente que contenía 10 ml de agua y otro con 10 ml de NaOH (1M) y se

incubaron a 25° C. A los cuatro días se determinó la cantidad de CO_2 absorbido en el NaOH, para lo cual se adicionó 10 ml de BaCl. Se transfirió esta mezcla a un erlenmeyer y se adicionó tres gotas de fenolftaleína, se tituló la solución con HCl (0,5M). Se determinó el CO_2 generado en los tres días de incubación.

La Biomasa Microbiana se determinó por medio de la metodología de fumigación extracción (Vance et al. 1987), para lo cual se pesaron 10 g de muestra (control) en un erlenmeyer de 250 ml, se

adicionó 50 ml de K_2SO_4 (0,5M), se agitó 30 min. y se filtró con un papel Whatman 42. Se guardó el extracto a 4 °C hasta su procesamiento. También, se pesó 10 g de muestra (fumigado) en un beaker de 40 ml, se fumigó con cloroformo libre de etanol, se incubó durante 24 h a 25 °C. Se procedió igual que la muestra control. Del extracto obtenido se colocó ocho ml en tubos de digestión (tres repeticiones control y tres fumigado), se adicionó dos ml de $K_2Cr_2O_7$ (66,7 mM), 70 mg de HgO y 15 ml de mezcla ácida (2v H_2SO_4 (98 %) y 1v H_3PO_4 (88 %)). Las muestras se digirieron a 150 °C por 30 minutos y se dejaron enfriar. Se transfirieron a un erlenmeyer de 250 ml, se adicionó 80 ml de agua destilada, se agregó tres gotas de fenantrolina y se valoró el exceso de $K_2Cr_2O_7$ con sal de Mohr 33,3 mM $(NH_4)_2 Fe(SO_4)_2 \cdot 6(H_2O)$.

Para determinar la Diversidad Funcional, se recurrió a la capacidad de las comunidades microbianas del suelo para utilizar una variedad de fuentes de carbono, se midió con Biolog Eco-Plates (Biolog Inc., EE.UU.). El sistema Biolog Eco-Plates constaba de 31 fuentes de carbono más un pozo control que contiene agua. Las fuentes de carbono se subdividieron en seis grupos de sustratos, incluidos carbohidratos, ácidos carboxílicos, aminoácidos, polímeros, ácidos fenólicos y aminas. Los microorganismos del suelo se extrajeron de acuerdo con el procedimiento seguido por Luan et al. (2020). En primer lugar, se añadieron 5 g de suelo (equivalente en peso seco) a 45 ml de solución salina estéril al 0,85 % (peso/vol). A continuación, la mezcla se agitó durante 30 min a 90 rpm en un agitador orbital y se dejó reposar durante 2 h. Posteriormente,

1 ml del sobrenadante se diluyó a 20 ml con solución salina esterilizada. Cada pocillo de Biolog EcoPlates se inoculó con 200 μ l de la suspensión mixta, después de lo cual las placas se incubaron a 25 °C en la oscuridad durante siete días. La tasa de utilización de las fuentes de carbono se determinó mediante la reducción del tinte redox violeta de tetrazolio, que cambia de incoloro a púrpura si los microorganismos agregados utilizan el sustrato. El desarrollo de color de pozo promedio (AWCD), que indica la utilización de carbono, se calculó tomando medidas de absorbancia a 590 nm cada 24 h. Para el análisis posterior se utilizó la absorbancia en un único punto de tiempo (96 h), cuando se alcanzó la asíntota. Las mediciones de la densidad óptica a 590 nm (OD590) de cada pocillo se corrigieron restando los valores de control (pocillo en blanco) de los valores que representan cada pocillo de la placa.

Paso 3: Para el indicador macro de Densidad Aparente, se tomó una única muestra representativa de la hectárea seleccionada. Esta se realizó bajo el método del cilindro, con la metodología descrita por Forsythe (1980). Se introduce un cilindro de aluminio de cinco cm de alto por cinco cm de diámetro en el suelo, con ayuda de un muestreador de suelos y un mazo de hule para no compactar la muestra, se saca el cilindro lleno de suelo con la ayuda de un palín o puñal, y con ayuda de una cegueta se elimina la rebaba que sobra del cilindro por ambas partes de este, tratando en todo momento de que la muestra sea indisturbada y no compactada. El cilindro se coloca en la parte superior del suelo (generalmente horizonte Ap) en forma vertical (Figura 4).



Figura 4. Ilustración de la extracción de la densidad aparente del suelo, con el método del cilindro para muestra indisturbada, se puede observar el muestreador y mazo de hule para no compactar. INTA. Agosto, 2022.

Paso 4: para evaluar el indicador macro de productividad del suelo se utilizó en las fincas de café, pasar una encuesta a los productores para preguntarles la productividad de la cosecha de café 2021, puesto que la cosecha del año 2022 todavía no estaba disponible. En Costa Rica, la producción de café se mide en fanegas/ha, una fanega es igual a 46 kilogramos de grano oro aproximadamente, por tanto, en la base de datos se anotó la producción en toneladas métricas por hectárea. En cuanto a las seis fincas de ganadería la producción se evaluó en toneladas de masa seca/ha, aplicando la técnica del Botanal® (Franco, 2005) (Figura 5), para determinar producción de biomasa, además se tomó una muestra compuesta de pasto la cual se transportó en

bolsas de papel selladas y previamente identificadas con la variedad de pasto, edad fenológica y la identificación de la finca, la muestra se toma, de tal manera que se asemeje al comportamiento del animal cuando ingiere la planta, utilizando una tijera podadora y dejando el pasto a la altura que normalmente la dejan los semovientes; con las muestras de pasturas se realizarán los análisis bromatológicos tanto de la fracción proximal (proteína cruda, materia seca) como la fracción Van Soest (fibra detergente neutra, fibra detergente ácida y digestibilidad in vitro de la materia seca), lo cuál se determinó en el laboratorio de piensos y forrajes del INTA para determinar la calidad nutricional de los pastos evaluados.



Figura 5. Aplicación de la técnica del botanal® a las diferentes pasturas, según las variedades encontradas en cada finca. INTA. Agosto, 2022.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El 67 % de las fincas ganaderas presentaron una fertilidad química disponible muy baja y el 33 % una fertilidad química disponible baja, según los parámetros del Decreto Ejecutivo No. 41960-MAG-MINAE. Por su parte, el 80 % de las fincas de café presentaron una fertilidad muy baja,

un 10 % presentaron fertilidad baja y un 10 % fertilidad media (Cuadro 1). Esta última finca, clasificó preliminarmente, con criterio de experto dentro del Orden de los Alfisoles, mientras que las 15 fincas restantes dentro del Orden de los Ultisoles.

Cuadro 1. Datos de fertilidad química disponible en las 16 fincas evaluadas con el Protocolo Manejo Sostenible del Suelo (PMSS)

ID Finca	pH H ₂ O	Cmol (+)/l					mg/l					% Sat. Acidez	% Sat. Bases	% MO	% CO	CICE Cmol (+)/l	Categorización de Fertilidad Química
		Ca	Mg	K	Acidez	Suma de Bases	P	Fe	Cu	Zn	Mn						
F1	5,5	0,9	0,5	0,14	1,6	1,54	7	121	7	1,8	19	50,9	49,04	10,10	5,86	3,14	Muy Baja
F2	5,3	0,7	0,5	0,16	1,6	1,36	5	117	3	3,3	11	54,4	45,95	12,91	7,49	2,96	Muy Baja
F3	4,7	2	0,5	0,74	3,4	3,24	12	247	13	3,4	60	51,2	48,80	0,97	0,56	6,64	Muy Baja
F4	4,6	1,6	0,5	0,91	3,4	3,01	22	419	16	2,5	47	52,9	46,96	8,84	5,13	6,41	Muy Baja
F5	4,6	1,8	0,5	0,46	4	2,76	11	408	12	1,4	33	58,8	40,83	6,34	3,68	6,76	Muy Baja
F6	5,2	20,4	7,1	1,4	1,7	28,9	9	14	4	1,4	37	5,6	94,44	1,71	0,99	30,6	Muy Baja
F7	4,9	6,2	1,2	1,03	5,7	8,43	11	212	9	2,2	69	40,1	59,66	2,76	1,6	14,13	Muy Baja
F8	5,7	14,7	4,6	2,4	0,2	21,7	27	120	20	9,7	47	1,1	99,09	4,93	2,86	21,9	Media
F9	5,2	4,6	0,5	0,87	0,8	5,97	14	198	27	3	33	11,8	88,18	6,84	3,97	6,77	Baja
F10	4,8	8,4	2,7	0,94	4,7	12,04	31	351	15	5,4	69	28	71,92	4,15	2,41	16,74	Muy Baja
F11	5,3	11	2,7	0,94	1,3	14,64	8	155	16	2	76	8,1	91,84	5,14	2,98	15,94	Muy Baja
F12	4,9	3	0,8	0,71	4,6	4,51	13	150	11	3,7	48	50,8	49,51	4,00	2,32	9,11	Muy Baja
F13	5,4	5,8	1,4	0,46	0,4	7,66	25	204	26	5,6	80	4,7	95,04	5,33	3,09	8,06	Baja
F14	5,3	4,3	1,3	0,21	0,7	5,81	7	196	19	2,6	52	10,5	89,25	5,38	3,12	6,51	Baja
F15	5,2	11,4	5,9	0,39	4,6	17,69	4	83	14	2,5	126	20,6	79,36	2,95	1,71	22,29	Muy Baja
F16	5,5	12,1	4,3	0,62	0,4	17,02	4	102	18	2,4	46	2,4	97,70	4,67	2,71	17,42	Muy Baja

De las fincas dedicadas a la producción de café, un 30 % presentan valores bajos de Carbono Orgánico en el suelo (COS <1,15 %) (Fassbender, 1993), las fincas F3, F6 y F12; un 10 % valores medios (COS 1,20-2,3 %), finca F7; y un 60 % valores altos (2,40-5,80 %), fincas F4-F5-F8-F10 y F11. Las fincas que presentan valores bajos de CO tienen 2 años de ser laboradas bajo técnicas de agricultura conservacionista y sostenible, las de valores medios oscilan entre un año y cuatro años, y las de valores altos tienen dos años de haber adoptado técnicas agroconservacionistas, porque es café renovado (nuevo), sin embargo, la finca 11 a pesar que renovó el café hace dos años,

tiene 20 años de ser laborada bajo un enfoque agroconservacionista (Cuadro 1).

En cuanto a las fincas de ganadería, la mitad de éstas presentan valores altos de CO (50 %, Fincas 13-14 y 16) (Fassbender, 1993), dos fincas presentan valores muy altos (33,34 %, Fincas 1 y 2), en donde ambas fincas tienen diez años de trabajar bajo prácticas agroconservacionistas del suelo. Finalmente, una finca presenta un valor medio (16,66 %, Finca F15, Fassbender, 1993), es decir en total las fincas ganaderas tienen valores de carbono orgánico del suelo, entre medio a muy alto (Cuadro 1).

En Costa Rica, Alvarado y Forsythe (2005) encontraron valores de densidad aparente para los Órdenes Ultisoles y Alfisoles que variaban entre 0,53 a 1,83 Mg.m⁻³ y de 0,96 a 1,42 Mg.m⁻³ cuando se comparaban los promedios. Por tanto, en esta investigación todos los valores encontrados se encuentran dentro de esos rangos (Figura 6); por lo cual se pueden considerar como valores normales, sin evidencia de compactación, ya que cuando pasan de 1,80 Mg.m⁻³ pueden tener problemas de compactación (Henríquez & Cabalceta, 1999).

El rango de densidad aparente para las fincas de café fue de 0,73- 1,42 Mg.m⁻³ y de 0,86-1,17 Mg.m⁻³ para las fincas de ganadería. Así como una media de 1 Mg.m⁻³ para las fincas de café y de 1,04 Mg.m⁻³ para las fincas de ganadería. Además, un 44 % de la totalidad de las fincas (café y ganadería) presentaron densidades aparentes menores a 1,00 Mg.m⁻³. Lo que evidencia que las 16 fincas bajo prácticas agroconservacionistas del suelo no tienen problemas de compactación, al menos por el método de la densidad aparente.

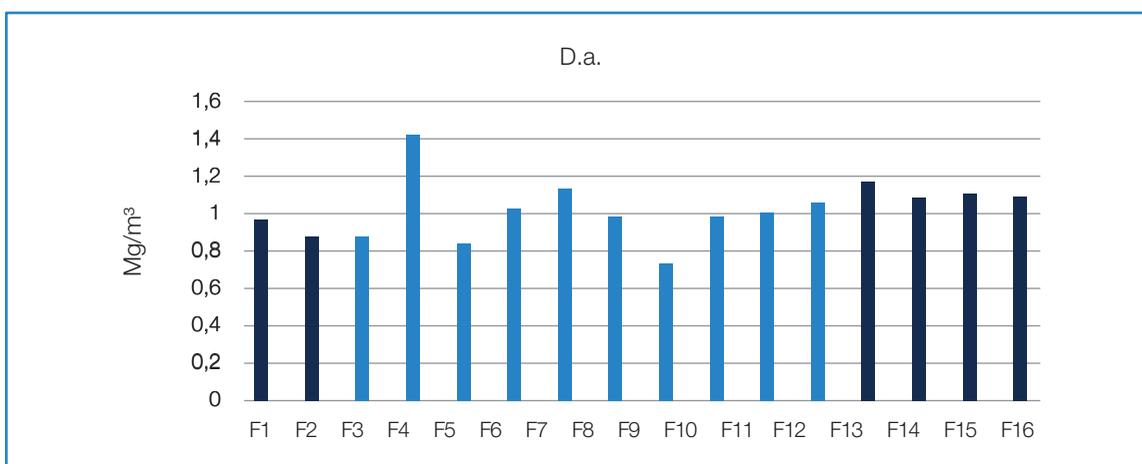


Figura 6. Datos de la densidad aparente en las 16 fincas evaluadas. En azul las fincas ganaderas y en celeste las fincas cafetaleras. INTA. Agosto, 2022.

Las fincas cafetaleras F4 y F5, alcanzan valores muy altos de respiración microbiana (valores >286 Mg CO₂-C/kg de suelo/día), y el resto de las fincas tanto de café como de ganadería presentan valores altos (>143 Mg CO₂-C/kg de suelo/día), (F1, F2, F6, F7, F8, F9, F10, F12), valores medios (>71 Mg CO₂-C/kg de suelo/día) (F11 y F14), valores bajos (<71 Mg CO₂-C/kg de suelo/día) (F13 y F16) y muy bajos (<43 Mg CO₂-C/kg de suelo/día) (F15) (USDA-NRCS, 2014) (Figura 7).

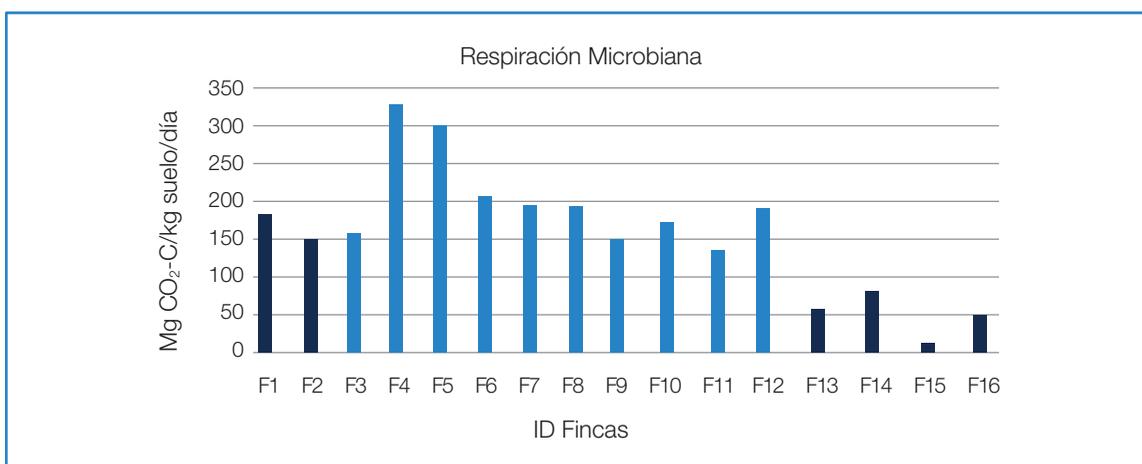


Figura 7. Datos de respiración microbiana en Mg CO₂-C/kg de suelo/día. Las fincas en color azul son las fincas dedicadas a la ganadería y las fincas en celeste son las dedicadas a la producción de café. INTA. Agosto, 2022.

Por su parte la Biomasa Microbiana se presentó en un rango entre 86-235 Mg C/kg de suelo en las fincas de café y de 136-340 Mg C/kg de suelo en las fincas de ganadería (Figura 8). La finca de ganadería F1 presentó el valor más alto de masa microbiana y la F8 los contenidos más bajos en las condiciones en que se evaluó el ensayo, en cuanto a época del año, y humedad en el suelo (Figura 8).

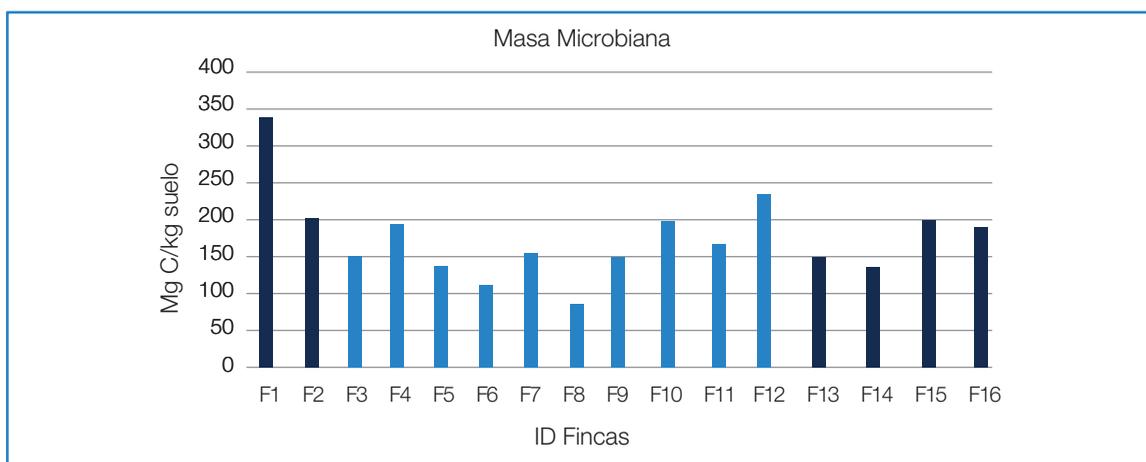


Figura 8. Datos de masa microbiana en Mg C/kg de suelo en las 16 fincas evaluadas con el protocolo MSS. Con relleno azul las fincas ganaderas y en celeste las fincas cafetaleras. INTA. Agosto, 2022.

Como indicador adicional a la actividad biológica se evaluó la meso y macrofauna del suelo por medio de la técnica Biolog-Ecoplatos para la Diversidad Funcional, y de esta manera evaluar un indicador de la biodiversidad edáfica. En este caso se midió bajo el índice de Shannon-Weaver, en donde $H < 2$, significa un índice de diversidad funcional bajo, un $H = 2-3$, sería un índice de diversidad funcional normal y un $H > 3$ indica un índice de diversidad funcional alto.

De las fincas de café y ganadería, ninguna finca presentó un índice de diversidad funcional bajo. Las fincas de ganadería F3 y F12 presentaron un índice de diversidad funcional normal, al igual que la finca F2 de ganadería. El resto de fincas presentaron un índice de diversidad funcional alto (Figura 9).

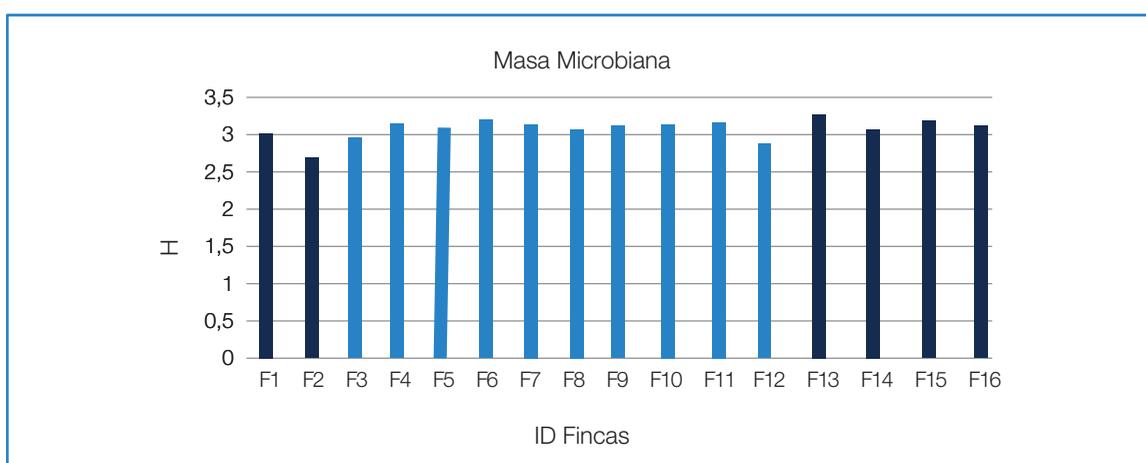


Figura 9. Datos de los índices de Shannon Weaver (H), un $H < 2$ se refiere a una diversidad funcional baja, un H entre 2-3, se refiere a una diversidad funcional normal y un $H > 3$ presenta una diversidad funcional alta. En color azul las fincas ganaderas y en celeste las fincas cafetaleras. INTA. Agosto, 2022.

En cuanto al índice de Productividad del Suelo, el promedio de producción de café de las diez fincas evaluadas es de 0,53 ton/ha, equivalente a aproximadamente 11,52 fanegas/ha en las cuencas evaluadas. Hay que tomar en cuenta que en Costa Rica el promedio de producción/ha a decaído un 30 % en los últimos 20 años, pasando de 28 fanegas/ha a 20 fanegas/ha (FAO 2021).

El rango de producción en los cafetales estuvo entre 0,045 ton/ha-0,85 ton/ha, es decir, de aproximadamente 0,97 fanegas/ha-18,48 fanegas/ha. Es decir, que la producción más alta de las fincas analizadas está cerca del promedio en Costa Rica, con tan sólo dos años de establecido.

De las seis fincas ganaderas evaluadas en la zona, cinco tenían un sistema de pastoreo y solamente una tenía pasto de corte.

La finca número 13 (F13), es la única de las fincas evaluadas que contaba con un sistema de pasto de corte, en dicha finca se encontró Pasto Cuba OM 22 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*).

De acuerdo con lo citado por Arronis (2022) (Cuadro 2) sobre la calidad nutricional y la producción de biomasa para el Pasto Cuba 22 OM a una edad de corte de 60 días, el pasto de la finca 13 se encuentra por debajo en producción de materia seca a esa edad, según lo reportado en la literatura, esto se puede deber a la densidad de siembra de este en la respectiva finca.

La finca F15, dentro de la validación del PMSS-FAO, presento la particularidad de que no había introducido una variedad de pasto mejorado, lo que se encontró fue una mezcla de Jengibrillo (*Paspalum notatum*) y *Brachiaria spp*,

esta situación dificulta hacer comparaciones con valores reportados en la literatura, pero esta mezcla tiene un buen perfil nutricional, aunque la producción de biomasa es bastante baja, esto se debe a que no se le está dando el suficiente tiempo de recuperación a la pastura, además que de las fincas evaluadas presentaba la mayor erosión, lo que puede ser una causa en la producción de biomasa.

Las fincas F1 y F16 contaban con *Brachiaria brizantha* de 30 a 40 días de edad. El perfil nutricional de la *Brachiaria brizantha* encontrada en la finca 1 y en la finca 16 evaluadas en el PMSS-FAO, estaban en el ámbito de lo expuesto por Martínez (2018) y Villalobos (2020) (cuadro 2 y 7), para este pasto en Costa Rica, con la excepción de la digestibilidad de la materia seca de la finca 1, donde este valor está por debajo de lo reportado por la literatura, esta variación se pudo dar debido a que la edad de la *Brachiaria brizantha* en la finca 1 era de 40 días mientras que en la finca 16 era de 30 días. Los valores de biomasa están muy similares entre ambas fincas, la diferencia se pudo dar porque en la finca 16 el potrero contaba con más árboles y tenía mayor pendiente, lo cual, pudo haber afectado la producción de biomasa por exceso de sombra y por una mayor erosión hídrica del suelo debido a una pendiente más pronunciada.

Las fincas F2 y F14 presentan Pasto Guinea variedad Mombaza (*Megathyrus maximus*) con una edad menor a 20 días de siembra. El contenido nutricional del pasto Mombaza en las fincas F2 y F14, está en el ámbito de lo citado por Martínez (2018) (Cuadro 2). El valor de digestibilidad encontrado en la finca 13 difiere debido a que la pastura tenía 13 días de siembra. La producción de biomasa también está asociada a la edad de la pastura, menor a 20 días de siembra.

Cuadro 2. Resumen de datos de análisis de laboratorio de las fincas ganaderas en la Segunda Fase del Proyecto, setiembre 2022

ID Fincas	Biomasa Ton/h/ms	% MS	% FDN	% FDA	% Lignina	% PC	% cenizas	DIVMS	Fuente
F1	8,1	21,79	76,40	36,32	3,02	8,89	9,79	55,09	PMSS-FAO F1
F2	3,3	26,40	79,15	44,71	2,41	10,90	10,31	51,14	PMSS-FAO F2
F13	4,80	10,50	63,99	32,16	5,99	8,61	15,28	92,33	PMSS-FAO F13
F14	1,0	18,92	64,63	28,82	3,16	12,51	10,16	93,45	PMSS-FAO F14
F15	2,7	26,91	73,93	39,24	2,29	8,96	15,76	58,05	PMSS-FAO F15
F16	7,4	20,45	72,22	40,76	3,31	6,44	11,52	81,08	PMSS-FAO F16
Referencia	-	25,63	69,46	35,06	2,03	8,17	9,97	72,55	Martínez, 2018
Referencia	-	-	68,00	-	-	8,20	-	66,65	Villalobos, 2020
Referencia	40,2	17,76	67,80	38,67	2,53	9,76	11,50	-	Arronis 2022

Todas las fincas seleccionadas para este estudio, estaban aplicando PMSSA en menor o mayor grado, la evaluación preliminar sobre el cumplimiento de las DVGSS (Cuadro 3), indica que en ninguna finca hay un cumplimiento alto de las DVGSS. En 10 fincas (62,5 %) hay un cumplimiento medio, en dos hay un cumplimiento bajo (12,5 %) y en 4 fincas (25 %) no se cumplen las DVGSS. En este último caso, en tres de las seis fincas ganaderas, no hay cumplimiento de las DVGSS. Las causas principales de la falta de cumplimiento de las DVGSS son la reducción de los rendimientos, problemas de erosión asociados comúnmente a ganadería intensiva en altas pendientes que causan pérdidas de nutrientes y materia orgánica.

A continuación, se muestran (Cuadro 3) algunos valores de caracterización de las fincas estudiadas, así como los años de implementación de prácticas de conservación de suelos y aguas y los resultados del escaneo del PMSS-FAO, con su grado de cumplimiento de las DVGSS: Alto (AC), Medio (MC), Bajo (BC) y No Cumplimiento (NC). En la última columna se pondera los resultados de los indicadores y se anota el Cumplimiento de las DVGSS de forma global para cada una de las fincas. Lo anterior, para visualizar mejor los resultados de los indicadores y fincas sobre el fondo, de acuerdo con el cumplimiento de las DVGSS: NC: rojo; BC: naranja, MC: amarillo y AC: verde (Cuadro 4).

Cuadro 3. Presentación de algunos datos de caracterización de las 16 fincas evaluadas, años de implementación de prácticas de MSS y escaneo del PMSS-FAO

ID	Nombre del Productor(a)	Coordenadas (grados decimales)	Altitud m s. n. m.	Lugar	Actividad	Capacidad de Uso de las Tierras	Años de implementación de Prácticas Agroconservacionistas	Escaneo del PMSS	Cumplimiento
F1	Miguel Alpizar Delgado	Latitud: 9,04497 Longitud: -84,50576	261	Desamaparados-San Mateo	Ganadería	III e12s1234c2 Uso Conforme	10	2,5	Bajo
F2	René Salazar Blanco	Latitud: 9,95189 Longitud: -84,50626	315	Desamaparados-San Mateo	Ganadería	V e12s1234d1c12 Uso Conforme	10	2,5	Medio
F3	Willman Alvarado Castillo	Latitud: 10,03029 Longitud: -84,45331	1.153	Rincón de Zaragoza-Palmare	Café	VI e12s24d1c23 Uso Conforme	5	4	No
F4	Joaquín Rojas Vargas	Latitud: 10,03063 Longitud: -84,45088	1.076	Quebradas, Santiago-Palmare	Café	VII e12s124d1c23 Uso Conforme	5	5	Medio
F5	Arnoldo Herrera Pérez	Latitud: 10,02667 Longitud: -84,45556	1.1068	Quebradas, Santiago-Palmare	Café	VII e12s24d1c123 Uso Conforme	5	4	Medio
F6	Walter Chavarría Vargas	Latitud: 10,01304 Longitud: -84,47557	1.262	Berlín-San Ramón	Café	VII e12s1234d1c123 Uso Conforme	5	4,5	Medio
F7	Felipe Chavarría Vargas	Latitud: 10,02271 Longitud: -84,47608	1.311	Berlín-San Ramón	Café	VI e12s24d1c123 Uso Conforme	20	5,5	Medio
F8	Luisa y Rosa Rodríguez Solórzano	Latitud: 10,07550 Longitud: -84,44354	1.067	Buenos Aires-Palmare	Café	III e12s24c23 Uso Conforme	20	3	Medio
F9	Ronald Vásquez Rodríguez	Latitud: 10,04529 Longitud: -84,43253	1.028	Zaragoza-Palmare	Café	III e12s124d1c2 Uso Conforme	20	3	Medio
F10	Luis Ángel Chinchilla Mora	Latitud: 10,02668 Longitud: -84,46102	1.242	Zaragoza-Palmare	Café	VII e12s124d1c123 Uso Conforme	20	5	Bajo
F11	Walter Carranza Rojas	Latitud: 10,00769 Longitud: -84,44898	1.208	San Isidro-Atenas	Café	VII e12s124d1c123 Uso Conforme	20	6	Medio
F12	Manuel Antonio Rojas Pacheco	Latitud: 10,00972 Longitud: -84,45012	1.277	Santiago-Palmare	Café	VII e12s124d1c123 Uso Conforme	20	2	Medio
F13	Walter Vargas González	Latitud: 9,94826 Longitud: -84,55686	226	Higuito-San Mateo	Ganadería	V e2s124d1c2 Uso Conforme	20	1	No
F14	Patricia Soto Quesada	Latitud: 9,95580 Longitud: -84,59664	232	Jesús María-San Mateo	Ganadería	IV e12s234c2 Uso Conforme	20	3,5	Medio
F15	Benigno Miranda Molina	Latitud: 9,96336 Longitud: -84,46858	640	Desmonte-San Mateo	Ganadería	VII e12s1234d1c23 Divergencia de Uso	20	5	No
F16	Reyes Campos Miranda	Latitud: 9,95040 Longitud: -84,47638	678	Desmonte-San Mateo	Ganadería	VI e12s1234d1c23 Divergencia de Uso	30	6	No

Cuadro 4. Evaluación del cumplimiento del Manejo Sostenible del Suelo con las DVGSS según la tendencia que muestran los cuatro indicadores recomendados.

Cumplimiento	Tendencia
No	Uno o más indicadores muestran una tendencia al empeoramiento.
Bajo	Todos los indicadores mantienen los mismos valores.
Medio	Ningún indicador empeora y uno o dos indicadores mejoran.
Alto	Ningún indicador empeora y más de dos indicadores mejoran.

* Se considera que los indicadores mejoran o empeoran cuando la diferencia es de 5 % o más.

Las tierras de las cuencas: río Jesús María, río Grande de Tárcoles y río Barranca han sido degradadas por más de 100 años. En su mayoría estas fincas se han dedicado al cultivo de café y a la ganadería, y su degradación corresponde a malas prácticas agrícolas de manejo y conservación de suelos. Por ende, luego de haber cambiado y convencido a los productores de su manera

de laborar estas fincas, ellos han cambiado su manejo, a prácticas de manejo sostenible de los suelos, lo anterior, es una decisión difícil de llevar a cabo, primero por los costos en inversión de prácticas sin retorno económico y lo otro es lo lento de la recuperación de los suelos o tierras degradadas, más aún cuando se tiene poco tiempo de haber iniciado con estas prácticas de MSS.

LITERATURA CITADA

Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelo de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85-94.

Anderson, J. (1982). Measurement of CO₂ evolution rates. En K. Alef & P. Nannipieri (Eds.), *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry* (pp. 831-871).

Arronis, V. (2022). Ganadería suplementación. *Fichas Técnicas. Bancos Forrajeros Cuba OM 22*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015). *Carta Mundial de los Suelos*. Roma, Italia. <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/293688/>

Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). *Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos*. Roma, Italia. <https://>

[rds.org.co/apc-aa-les/ba03645a7c069b5e-d406f13122a61c07/sueloa-i6874s.pdf](https://www.fao.org/apc-aa-les/ba03645a7c069b5e-d406f13122a61c07/sueloa-i6874s.pdf).

Food and Agriculture Organization-Intergovernmental Technical Panel on Soils (FAO-ITPS). (2020). *Protocol for the assessment of sustainable soil management*. Roma, Italia. https://www.fao.org/fileadmin/useupload/GSP/SSM/SSMProtocol_EN006.pdf.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). *FAOSTAT 2021*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

Fassbender, H. W. (1993). *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales* (2a ed.). CATIE.

Forsythe, W. (1980). *Física de suelos. Manual de laboratorio*. IICA.

Franco, Q., Calero, D., & Durán, C. (2005). Evaluación de tecnologías por métodos participativos para la implementación de sistemas ganaderos sostenibles en el norte del departamento del

Valle del Cauca. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Universidad Nacional de Colombia.

Henríquez, C., & Cabalceta, G. (1999). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. UCR, Facultad de Fitotecnia.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), & Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas (Minae). (2019). *Decreto 41960 metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras agroecológicas de Costa Rica*. Diario Oficial La Gaceta, 215.

Martínez, A. (2018). *Tabla de composición bromatológica de forrajes utilizados para la alimentación de animales en Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.

Peech, L., Alexander, L. T., & Dean, L. A. (1974). *Methods of soil analysis fertility investigations*. USDA Circular No. 8.

USDA-NRCS. (2014). *Soil respiration. Soil Health - Guides for Educator Series*. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051573.pdf.

Vance, B., Brookes, P., & Jenkinson, D. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 703-707.

Villalobos, L. (2020). *Fichas de forrajes. Red Nacional de Pastos y Forrajes*.

Walkley, A., & Black, C. A. (1938). An examination of the Degtiareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.