

REMINERALIZADORES DE SUELOS Y SISTEMAS AGROFORESTALES: UNA OPCIÓN PARA LA CAPTURA DE CO₂

Gustavo Soares¹, Suzi Huff Theodoro², André Mundstock Carvalho³, Diego Burbano⁴, Claudete Ramos⁵

^{1,2,4}Programa de Pos-Graduación en Medio Ambiente e Desenvolvimento Rural, Universidad de Brasília. Brasil.

composteirascaseiras@gmail.com / suzitheodoro@unb.br* (autora correspondiente) diegopipe84@hotmail.com

³Programa de Pos-Graduación en Agronomía - Universidad Federal de Viçosa / Campus Rio Paranaíba. Brasil.

andre.carvalho@ufv.br

⁵Universidad de la Costa, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Colombia.

cgindri@cuc.edu.co

Resumen

Los sistemas agroforestales (SAFs) se muestran como una opción viable para garantizar la producción de alimentos de forma más sustentable. Para potenciar este tipo de sistema de producción, el uso de remineralizadores de suelos (harina/polvo de rocas silicatadas) (REM) puede ampliar la oferta de nutrientes y facilitar el desarrollo de las especies vegetales inmersas en el sistema. Además, un mayor crecimiento vegetal asociado al biointemperismo mineral de los polvos de rocas puede resultar en una mayor retención de CO₂ atmosférico. Este trabajo tiene como objetivo evaluar en qué medida las prácticas de manejo y el uso (o no) de los REM, aplicados en la implantación de cuatro sistemas agroforestales en la región del cerrado brasileño, contribuyeron a la mejora de parámetros químicos del suelo, desarrollo de los SAFs y consecuente incremento en el secuestro de CO₂. Durante un año fueron analizados atributos de fertilidad del suelo y el crecimiento de seis especies arbóreas presentes en los diferentes SAFs. Los datos obtenidos en este estudio observacional fueron sometidos al procedimiento no paramétrico "ANOVA on Ranks" y los promedios fueron comparados por contrastes (*test t*) y por la prueba de Tukey. Los resultados mostraron que las áreas que recibieron los polvos de rocas presentaron mejores niveles de fertilidad, lo que posiblemente tuvo influencia en el desarrollo de las especies arbóreas analizadas y, por consiguiente, su potencial de captura de CO₂.

Palabras clave: Agroforestría, biointemperismo, harinas de rocas, secuestro de CO₂.

Introducción

Diversos problemas ambientales se han aumentado con el uso inadecuado de los recursos naturales. La simplificación de los ecosistemas por la reducción de la biodiversidad y la degradación del suelo están entre las principales causas de este problema, casi siempre relacionadas con la agricultura (Botkin y Keller, 2011). Se conectan a ellos el uso excesivo de agrotóxicos, el desorden de las cadenas productivas locales, la ruptura de los ciclos de recuperación de nutrientes y la dependencia por fertilizantes industrializados (Manning y Theodoro, 2020). Estos problemas han resultado en intensos debates sobre el modelo de producción, especialmente en la agricultura. Los modelos de producción convencional necesitan de un uso intensivo de insumos químicos, máquinas y tecnologías asociadas al gran consumo de fuentes no renovables de energía (Foley *et al.*, 2011, Srivastava *et al.*, 2016). Aunque desde el punto de vista de la productividad (eficiencia por unidad de área) este sistema exhibe recurrentes casos de éxito, también ha contribuido significativamente a las emisiones de CO₂ fósil, tanto por su mayor dependencia, como por los insumos externos y su menor capacidad de mantener los valores de carbono del suelo (Rangel y Silva, 2007). Bajo

esta perspectiva, la eficiencia de estos sistemas debería también evaluarse desde el punto de vista de la cantidad de recursos demandados (producción por unidad de recursos minerales y energéticos consumidos).

Para encontrar opciones más eficientes, varias propuestas de prácticas y tecnologías alternativas han sido investigadas y/o implementadas. En este trabajo trataremos de las tecnologías o prácticas agrícolas, que combinadas pueden ampliar los mecanismos de captura y retención de CO₂ atmosférico, así como contribuir al mantenimiento de la fertilidad del suelo. Se trata del uso combinado de sistemas agroforestales (SAFs) y de remineralizadores (REM). King y Chandler (1978) han conceptualizado los SAFs como técnicas sostenibles de uso de la tierra que combinan la producción de cultivos agrícolas con árboles frutales o forestales y/o animales, utilizando la misma unidad de tierra y aplicando técnicas de manejo compatibles con las prácticas culturales. Esta concepción se vuelve bastante oportuna porque caracteriza a los SAFs como arreglos productivos ligados a la sostenibilidad, a la adaptabilidad y a la clasificación temporal de los sistemas agroforestales.

Además de estas ventajas, los SAFs, cuando se implantan a pequeños agricultores, potencian la estadia de las familias en el campo, debido principalmente al

aumento de la demanda de mano de obra, a la ampliación de la seguridad alimentaria y de las condiciones de vida, promovidas por la diversidad de producción (Paludo y Costabeber, 2012). Tilman *et al.* (2002) e Altieri *et al.* (2012) sugieren que la sociedad debería recompensar a los agricultores que utilizan rutas tecnológicas o prácticas más sustentables, particularmente a aquellos que colaboran para fortalecer y potenciar los servicios ecosistémicos. Los SAFs contribuyen a la protección de los suelos, frenan procesos erosivos y de degradación, además de auxiliar en la conservación de los remanentes forestales, conservación de las especies arbóreas de valor ecológico y conservación de manantiales y cursos de agua, manteniendo la función de protección y actuación de corredores ecológicos interconectando fragmentos forestales (Asare *et al.*, 2014).

En la búsqueda de rutas alternativas para ampliar la disponibilidad de nutrientes (sin el uso de insumos convencionales) se ha sugerido la adopción de la tecnología de enmiendas minerales, o *Rochagem*, que recomienda el uso de remineralizadores (polvo de rocas silicatadas) con el fin de mejorar los niveles de fertilidad de los suelos. Leonardos *et al.* (1976) y Carvalho *et al.* (2018) sugirieron que la adición al suelo de determinados tipos de rocas ricas en macro y micronutrientes, al suelo amplía la oferta de nutrientes. Theodoro *et al.* (2020) sugirieron que el uso de esos materiales posibilita el rejuvenecimiento de los suelos empobrecidos químicamente o lixiviados, fundamentándose en la búsqueda del equilibrio de la fertilidad, en la conservación de los recursos minerales y en la productividad sostenible. Se destaca que este insumo puede estar disponible local/ regionalmente, es más barato que los insumos convencionales, lo que tiende a dar como resultado producciones más sustentables (Theodoro, 2000; Theodoro y Leonardos, 2015; Ramos *et al.*, 2021).

El suelo es uno de los parámetros más importantes en la evaluación de sistemas de producción, ya que posee características que definen el crecimiento de las plantas e indican al grado de sostenibilidad del sistema. La utilización de SAFs biodiversos se muestra como un mecanismo altamente eficaz en el secuestro y almacenamiento de carbono, en la biomasa vegetal y en el suelo, especialmente cuando los principales componentes florísticos son arbóreos, debido a su rápido crecimiento y alta productividad (Nair *et al.*, 2009). En este sentido, la ejecución de acciones que favorezcan la captura de CO₂ ha sido incentivada a partir de los informes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2018), donde se destaca que actividades agrícolas aliadas al manejo forestal reducen de forma considerable las emisiones de CO₂, al igual que aumentan su remoción de la atmósfera, con bajos costos (Churchmann *et al.*, 2020).

Los sistemas agroforestales, y los bosques en general, forman parte del menú de estrategias para mitigar los desequilibrios climáticos, ya que en su proceso de crecimiento utilizan la fotosíntesis, donde se absorbe el CO₂ atmosférico, el cual se fija en la biomasa vegetal. La cantidad expresada en masa del material vegetal disponible

en un bosque se refiere a sus componentes: biomasa viva sobre el suelo (compuesta de árboles y arbustos), muerta sobre el suelo (compuesta por la hojarasca y troncos caídos) y debajo del suelo (compuesta por las raíces). La evaluación de las reservas de carbono (C) contenidas en estos componentes forestales es fundamental para su gestión eficaz y también como mecanismo para reducir las emisiones de CO₂, no solo en la parte aérea, sino también a nivel del suelo (Kothandaraman *et al.*, 2020).

La región del Distrito Federal, ubicado en el centro de Brasil, posee características importantes para la adopción de SAFs y para la ampliación del uso de REM, entre las cuales se puede citar: la gran cantidad de áreas degradadas por la agricultura y la ganadería; la alta densidad de pequeñas propiedades; la deficiencia en las prácticas de conservación del suelo y la oferta de diferentes tipos de rocas ricas en nutrientes (Soares, 2018). Considerando estas potencialidades y demandas, la investigación que resultó en el presente artículo tuvo como objetivo principal analizar en qué medida el manejo de SAFs asociado a la práctica del uso de REM contribuyó a la ampliación de la oferta de nutrientes en el suelo y al desarrollo de los SAFs (con consecuente ampliación de la captura y retención del CO₂). Estos objetivos se basaron en la hipótesis de que los SAFs que utilizan REM posibilitan la ampliación de los niveles de fertilidad de los suelos y el aumento de la biomasa sobre el suelo, contribuyendo decisivamente al desarrollo forestal, que, en última instancia, permite una mayor eficiencia en la fijación de CO₂, debido a una fotosíntesis más intensa.

Materiales y métodos

Caracterización general del estudio

Un estudio observacional fue conducido buscando comparar dos formas de manejo del suelo ("SAFs" y "testigos" o controles), en cuatro áreas. Las áreas estudiadas consistieron en cuatro módulos de sistemas agroforestales en diferentes regiones del Distrito Federal (donde se encuentra Brasilia, la capital de Brasil) y cuatro áreas adyacentes (testigos sin SAFs y sin remineralización, bajo el mismo tipo de suelo e histórico de uso). La ubicación de estas áreas se puede ver en la Figura 1. Las áreas (pequeñas fincas) están ubicadas en la región central del Brasil, en el Distrito Federal, las cuales fueron denominadas como ÁREA 1 - Sítio Pinheiro; ÁREA 2 - Sítio Raiz; ÁREA 3 - Sítio Semente y ÁREA 4 - Eloflorestal Inkora. Todas las glebas poseían tres años de implantación y estaban insertadas en el Sabana, presentando suelos del tipo Latosol (EMBRAPA, 2013).

La diferencia más marcada entre las áreas estudiadas fue el uso de REM en tres de ellos. Sólo el Área 1 no utilizó este insumo mineral en la implantación del sistema agroforestal (Tabla 1). El clima de la región es, de acuerdo con la clasificación de Köppen, del tipo Aw, característico de áreas con clima húmedo tropical, con dos estaciones bien definidas (seca en el invierno y húmeda en el verano). En la mayoría de los casos, la precipitación

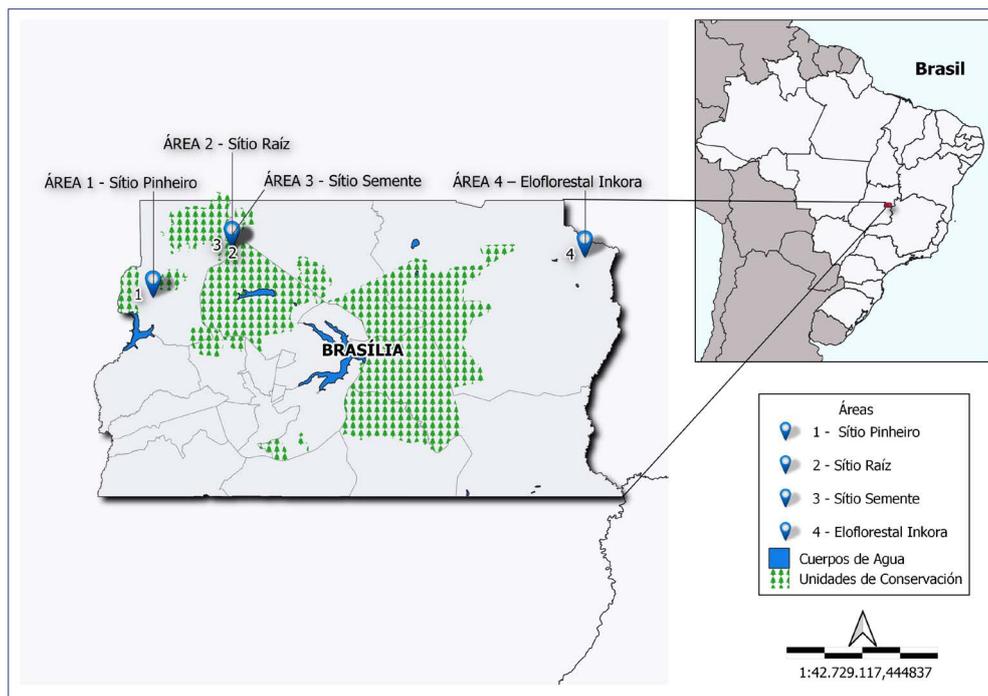


Figura 1: Localización de los cuatro sistemas agroforestales.

media anual es de 1469 mm, con distribución concentrada en el período de octubre a mayo (INMET, 2018).

Tabla 1 – Identificación del sistema, tipo de suelo (en el sistema brasileño de clasificación (SiBCs) y en los sistemas WRB/Soil Taxonomy) y remineralizador utilizado.

Sistema	Tipo de suelo (SiBCs)	WRB/Soil Taxonomy	Remineralizador (REM)
SAF1	Latosol Rojo-Amarillo	Ferralsols/Oxisols	Ausente (+ caliza)
SAF2	Latosol Rojo	Ferralsols/Oxisols	REMAX*
SAF3	Latosol Rojo	Ferralsols/Oxisols	REMAX* (+ caliza)
SAF4	Latosol Rojo	Ferralsols/Oxisols	MB-4** (+ cal)

OBS: * y ** - Nombres comerciales de los REM

Es de destacar que las cuatro áreas tienen una amplia diversidad de especies agrícolas y leguminosas, además de las forestales, pero estos datos no se reportan en este estudio. Los sistemas de manejo con SAFs difieren parcialmente de las especies arbóreas y herbáceas cultivadas, así como otras particularidades de manejo, como el de fertilidad del suelo, sin embargo, hubo muchas similitudes, destacadas para el uso de los REM (REMAX y MB-4) como principal forma de aporte externo de nutrientes, excepto en el Área 1, donde este insumo no

fue utilizado. El remineralizador REMAX es una roca metamórfica (esquisto calcítico) esencialmente compuesta por CaO (13.5%), K₂O (2.65%), MgO (7.49%), SiO₂ (43.8%), Al₂O₃ (9.11%), FeO (4.89%) y que posee una esquistosidad marcada por la alternancia de moscovita (KAl₂(Al₂Si₃)O₁₀(OH)₂) y clorita (Mg₅Al(AlSi₃O₁₀)(OH)₈), intercalados con cristales de calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)₂) y cuarzo (SiO₂). El remineralizador MB-4 está compuesto por una mezcla de rocas (esquisto biotítico y serpentina). Químicamente presenta una composición multinutriente con predominio de SiO₂ (39.73%), Al₂O₃ (7.10%), Fe₂O₃ (6.86%), CaO (5.90%), MgO (17.82%), Na₂O (1.48%), K₂O (0.84%), P₂O₅ (0.075%) y otros micronutrientes. En la implementación de cada área, se agregó el equivalente a 5 t ha⁻¹ a las principales líneas de plantación de árboles y especies agrícolas. También se realizó una cubierta con paja triturada, como una forma de proteger el suelo de la erosión y reducir la necesidad de riego.

Diseño de muestras y evaluaciones

Las áreas fueron estudiadas en dos estaciones/épocas del año (verano e invierno), consideradas como repeticiones. Por tanto, la estructura muestral siguió un esquema factorial anidado 2 x 4 (dos tipos de manejos en cuatro áreas distintas), siendo los efectos de las particularidades de cada SAFs desdoblados. Esta estructura muestral permitió establecer dos comparaciones principales de interés: (i) evaluar los SAFs en cuanto a sus capacidades de mejorar los parámetros de suelo en relación con el manejo "sin SAFs"; (ii) comparar los SAFs en cuanto a la capacidad de promover tanto el crecimiento de plantas y de promover mejoras en parámetros

químicos del suelo. En este último caso, se hizo especial énfasis en la comparación entre los SAFs que recibieron REM y el SAF que no recibió este insumo (Área 1).

Las muestras de suelo fueron recolectadas a una profundidad de 0 - 20 cm, con ayuda de una barrena tipo holandés, en cada uno de los lotes en estudio. Las muestras recogidas fueron homogeneizadas, secadas al aire y tamizadas en tamiz con malla de 2 mm de apertura. La disponibilidad de los nutrientes fósforo (P) y potasio (K) fue evaluada en espectrofotómetro de absorción molecular y de emisión en llama, respectivamente, después de la extracción en Mehlich-1. La disponibilidad de los nutrientes calcio (Ca), magnesio (Mg) y micronutrientes catiónicos se determinó en espectrofotómetro de absorción atómica después de la extracción en KCl 1 mol l⁻¹ y Mehlich-1. La disponibilidad de azufre (S) y boro (B) fue determinada en espectrofotómetro de absorción molecular después de la extracción en Ca (H₂PO₄)₂ en ácido acético y agua caliente, respectivamente. Los demás parámetros fueron evaluados según Embrapa (2013).

El crecimiento de las plantas fue evaluado por el diámetro a la altura del pecho (DAP). En este caso, como no había árboles en las áreas adyacentes a los SAFs que pudieran servir como testigos en las evaluaciones de parámetros de suelo, la estructura muestral fue simplificada para apenas cuatro predictores (las 4 áreas con SAFs), que fueron evaluadas en dos épocas distintas.

Para estimar el crecimiento de las plantas en los diferentes SAFs, fueron seleccionados diez individuos no bifurcados, de acuerdo con el interés económico y agronómico de cada sistema. Para el seguimiento del desarrollo de la vegetación se siguió (en parte) la metodología desarrollada por el ICRAF (Centre for Research in Agroforestry), descrita y adoptada por Arevalo *et al.* (2002). A pesar de la diversidad de especies utilizadas en los cuatro sistemas, se seleccionaron diez individuos de seis especies claves en cada SAF, para acompañar el DAP. Las especies monitoreadas fueron *Persea americana*, *Dipteryx alata*, *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, *Eucalyptus* spp., *Artocarpus heterophyllus* y *Hymenaea* sp.. Se optó por utilizar el nombre del fruto para discriminar la especie en análisis (Tabla 2). Los individuos

de la muestra fueron marcados con una cinta plástica y ubicados bajo un plano cartesiano entre el número de líneas y distancias en metros a partir del punto inicial de la línea. Los datos biométricos fueron recolectados, con cinta métrica, en los meses de enero y octubre de 2017.

Carbono secuestrado (CO₂)

Utilizamos la unidad de medida kg por planta (kg pl⁻¹) para evaluar la Reserva de Carbono (CE), considerando la Biomasa de Árboles Vivos (BA) y el Carbono Secuestrado (CS). Adoptamos la medida informada por el Informe de Cambio Climático (IPCC, 2007), que el contenido de carbono (C) en los árboles es aproximadamente el 50% del peso seco de su biomasa (PSB). Para el cálculo de la CE se utilizó un índice de 0.5 toneladas de CO₂. Al eliminar el CO₂ de la atmósfera y fijarlo a la biomasa, se consideró que el factor de conversión era 3.67 (Rügnitz *et al.* 2009). Para obtener el CO₂ emitido o almacenado a partir de la cantidad de C, el valor de CE debe multiplicarse por 3.67. De acuerdo con Nair *et al.* (2009), las metodologías para estimar los valores de carbono en los SAFs son bastante distintas, principalmente en cuanto a los cálculos utilizados para la cuantificación de la fitomasa. Los modelos de estimación deben aproximarse a la realidad, para no subestimar ni tampoco sobreestimar la cantidad de biomasa de un árbol, conjunto de árboles o bosque. Nuestra estimación de la BA acumulada en el período de enero a octubre de 2017, se obtuvo de la ecuación alométrica (BA = 0.1184 * DAP 2.53), sugerida por Arévalo (2002), como una forma de obtener el valor del CS.

Análisis estadístico

Debido a la complejidad de los SAFs, aunados a las limitaciones para la conducción de experimentos controlados convencionales con estos sistemas, fue necesario imponer un límite al tamaño de muestra del presente estudio observacional. De esta forma, considerando las limitaciones para la verificación de la normalidad de los residuos en estas condiciones, los datos fueron sometidos al procedimiento no paramétrico "ANOVA on Ranks" (Conover, 2012). Adicionalmente, fue realizado

Tabla 2. Principales características de las especies arbóreas analizadas.

Especie	Nombre Científico	Familia	Origen	Luminosidad	Altura	Presente en el SAF
Aguacate	<i>Persea americana</i>	<i>Lauraceae</i>	América Central	A pleno sol	> 12 m	1, 2, 3 e 4
Baru	<i>Dipteryx alata</i>	<i>Fabaceae</i>	América del Sur	A pleno sol	> 12 m	4
Café	<i>Coffea arabica</i> e <i>Coffea canephora</i>	<i>Rubiaceae</i>	África	A pleno sol y tolera sombra	< 5 m	1, 2, e 3
Eucalipto	<i>Eucalyptus</i> spp.	<i>Mirtaceae</i>	Oceania	A pleno sol	> 12 m	2 e 3
Yaca	<i>Artocarpus heterophyllus</i>	<i>Moraceae</i>	India	A pleno sol	> 12 m	1
Jatobá	<i>Hymenaea</i> sp.	<i>Fabaceae</i>	América del Sur	A pleno sol	> 12 m	4

Fuente: Lorenzi, (2009).

un análisis multivariado por función "Desirability" (sin asignación de pesos o límites para los parámetros) para los parámetros de suelo que presentaron diferencias significativas aisladamente. Los promedios fueron comparados entre sí por la prueba "Tukey on Ranks" a 5 y 10% de probabilidad de error. El análisis multivariado por la función "Desirability" también fue utilizado como estrategia para permitir la comparación de los datos de crecimiento de los árboles, que eran de especies diferentes en los sistemas evaluados. Por último, se añadieron dos contrastes complejos a las comparaciones de interés (C1: SAF con REM vs Testigos, C2: SAF con REM contra SAF sin REM) y probados por la prueba t a 1% (**) o 5% (*) de probabilidad. La medida de "effect size" "d Cohen" fue calculada para algunas comparaciones de interés (SAF vs testigo dentro de cada área). Las magnitudes de efecto "d Cohen" mayores que 0.8 se consideraron como "high effect" (Cohen, 1988). Los análisis se realizaron con la ayuda del software SPEED Stat (Carvalho *et al.*, 2020).

Resultados y discusión

Parámetros del suelo

Se observó una interacción entre los efectos de los manejos y de las áreas, para la mayoría de los parámetros evaluados (Tabla 3). Los valores de F de la ANOVA *on Ranks* indicaron diferencias significativas entre los manejos estudiados ("SAF" y "testigo"), pero estas diferencias ocurrieron de forma variable para cada una de las áreas. Excepto por los parámetros de Fe disponible, Cu disponible, acidez potencial (H + Al) y materia orgánica (MO), todos los demás parámetros de suelo evaluados presentaron diferencias significativas entre las áreas o manejos evaluados.

De un modo general, la disponibilidad de los macronutrientes P, K, Ca y Mg fue afectada positivamente por el manejo agroforestal con relación a sus respectivos testigos, con destaque para el área 3. Por ejemplo, los incrementos medios en los niveles de P y K en el suelo fueron del 144.7% y del 65.2%, respectivamente. Además, la estimación del contraste (C1) evidenció que hay un aumento en la disponibilidad de los macronutrientes en los SAF en relación con los testigos, considerando el promedio de las áreas 2, 3 y 4 (Figura 2). Este patrón no se observó para el Área 1, única área que no recibió fertilización con REM.

La disponibilidad de micronutrientes en el suelo también fue afectada positivamente por los manejos con SAF, en relación con los testigos sin SAF, donde se pueden destacar el resultado del manganeso en el área 3 y el boro en el área 4 (Figura 3).

Sin embargo, a diferencia del efecto observado para los macronutrientes, la estimación del contraste (C1) fue significativa sólo para uno de los micronutrientes evaluados (boro), sugiriendo que los remineralizadores fueron más eficaces en proporcionar macronutrientes que micronutrientes al suelo. De un modo general, los parámetros químicos del suelo como pH, Capacidad de Intercambio catiónico - CIC (T) y saturación por bases (V) fueron afectados positivamente por el manejo agroforestal con REM, en relación con sus respectivos testigos, como puede ser evidenciado por la estimación del contraste (C1) (Figura 4).

Este comportamiento no ocurrió en el área 1, donde el SAF no recibió fertilización con REM de suelo. Los SAF de las áreas 2, 3 y 4 (con REM) mostraron un incremento medio en el pH y en la CTC (T) de 16.4 y 24.6%, respectivamente, con relación a sus testigos. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas para los

Tabla 3. Valores de F de las "ANOVAs on Ranks" para los efectos de los manejos y de las áreas de muestreo para los parámetros de suelo evaluados. Valores seguidos de ** o * indican significancia a los niveles de 1 y 5 % de probabilidad de error.

Disponibilidad de macronutrientes en el suelo					
Predictores	P (mg dm ⁻³)	K (mg dm ⁻³)	S (mg dm ⁻³)	Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)
Áreas	2.50	1.99	1.11	1.25	3.86
Manejos	9.89*	6.54*	10.57*	3.97	10.28*
Interacción	4.20	4.06	2.05	3.29	5.03*
Disponibilidad de micronutrientes en el suelo (mg dm ⁻³)					
Predictores	Boro	Zinc	Hierro	Cobre	Manganeso
Áreas	1.07	1.16	3.84	1.03	1.04
Manejos	15.48**	1.22	0.20	1.92	0.88
Interacción	15.15**	2.56	0.45	1.37	2.02
Otros parámetros químicos del suelo					
Predictores	pH (CaCl ₂)	H+Al (cmolc dm ⁻³)	CIC (cmolc dm ⁻³)	M.O. (dag kg ⁻¹)	V (%)
Áreas	4.45	1.36	0.96	0.17	1.61
Manejos	8.27*	4.01	1.22	0.30	4.97
Interacción	1.97	0.97	1.40	0.15	2.19

Fuente: autores.

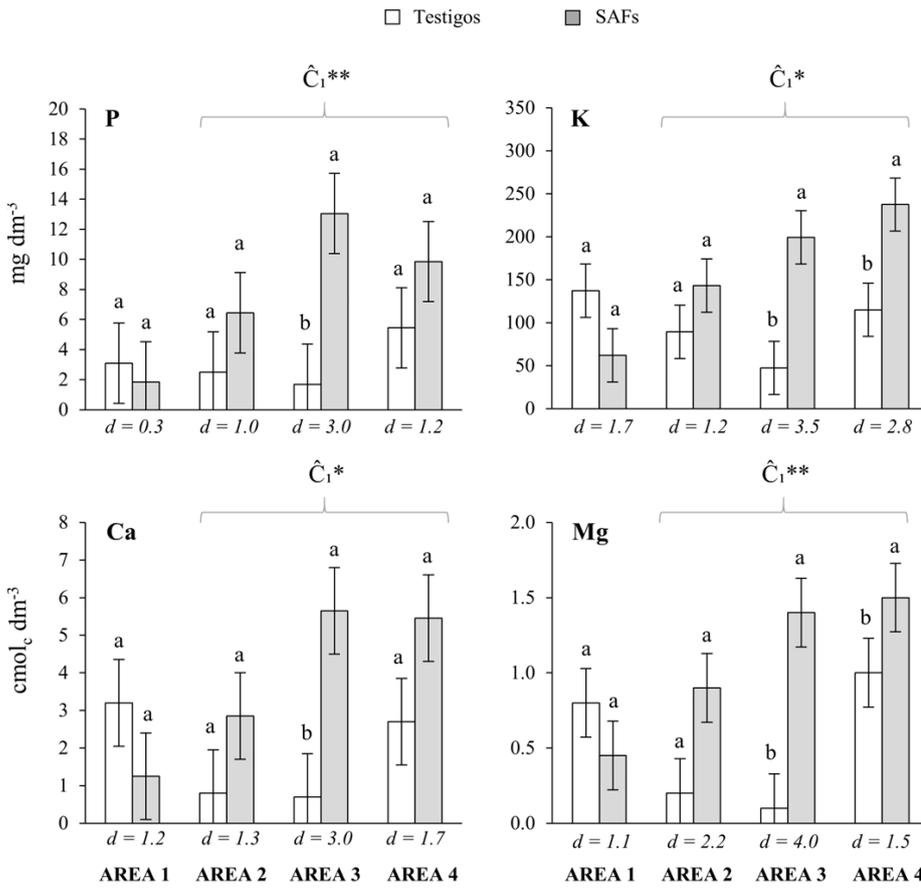


Figura 2. Disponibilidad de P, K, Ca y Mg en el suelo en función de los manejos "SAF" o "Testigos" en cuatro áreas de estudio. Área 1: SAF sin remineralizador. Áreas 2, 3 y 4: SAF con REM. Valores correspondientes al promedio de dos muestreos en diferentes épocas en cada área. Los promedios (\pm error estándar del estudio) seguidas por una misma letra, dentro de cada área, no difieren entre sí por la prueba de Tukey al 5% de probabilidad de error. C1: SAF con REM vs Testigos. Efecto de tamaño de Cohen (d) para las variables en la escala no transformada.

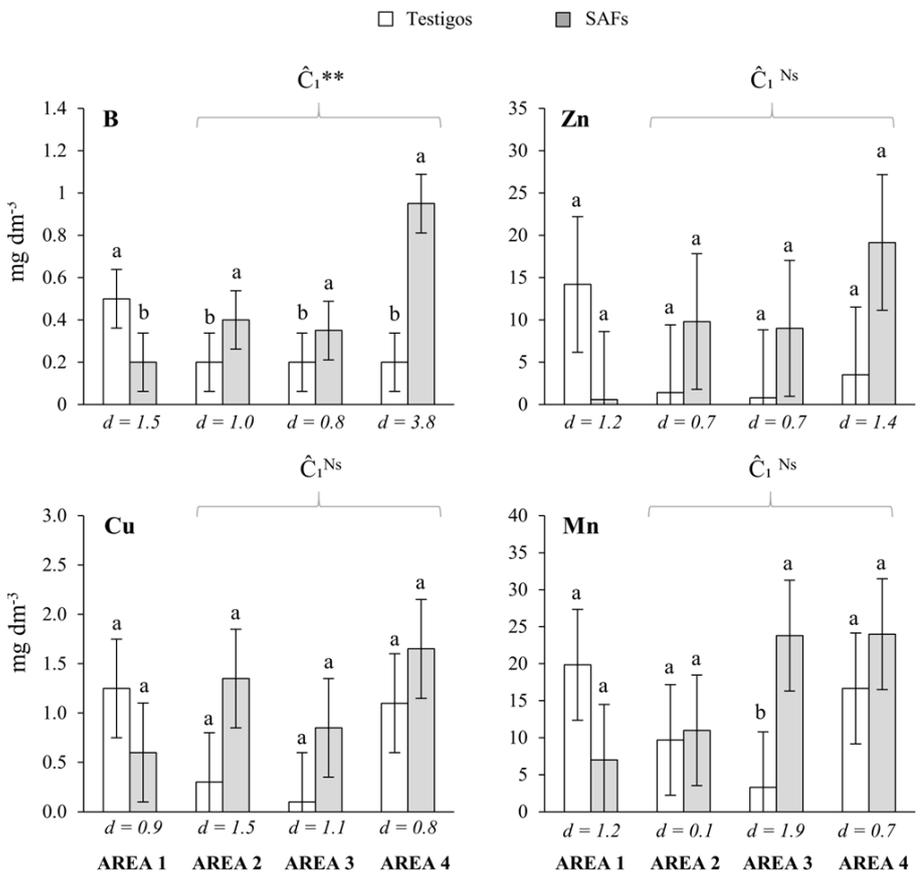


Figura 3. Disponibilidad de los micronutrientes B, Zn, Cu y Mn en el suelo en función de los manejos "SAF" o "Testigos" en cuatro áreas de estudio. Área 1: SAF sin REM. Áreas 2, 3 y 4: SAF con REM. Valores correspondientes al promedio de dos muestreos en diferentes épocas en cada área. Los promedios (\pm error estándar del estudio) seguidas por una misma letra, dentro de cada área, no difieren entre sí por la prueba de Tukey al 5% de probabilidad de error. C1: SAF con REM vs Testigos. Effect Size de Cohen (d).

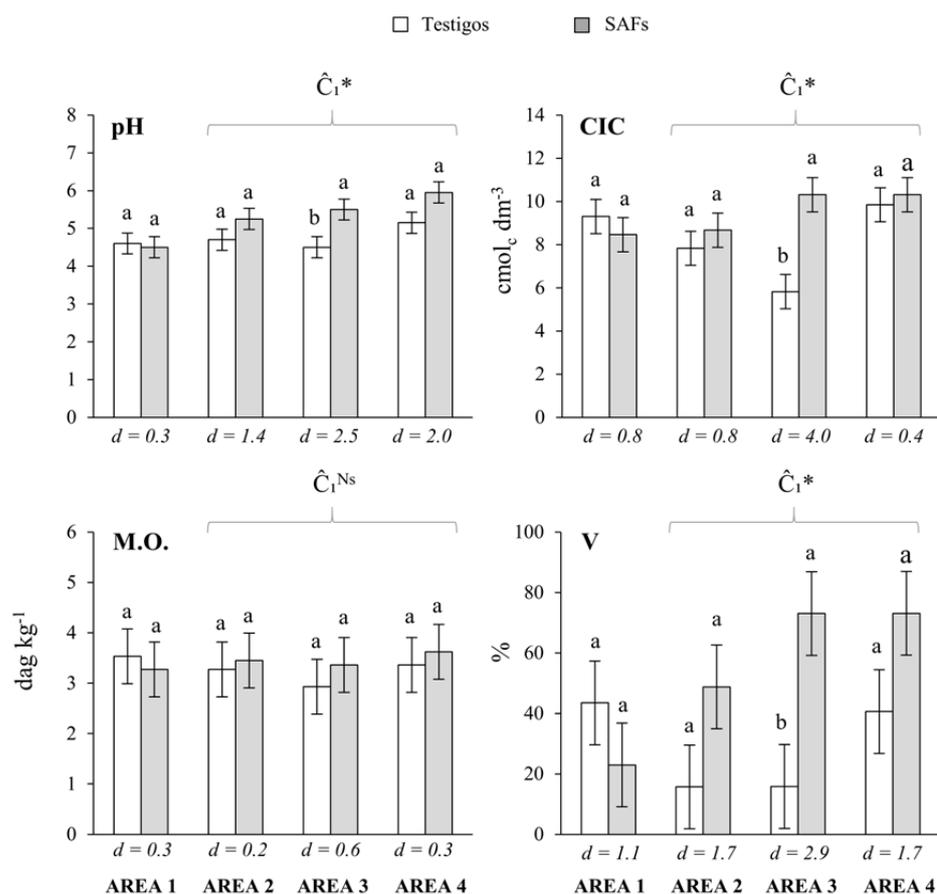


Figura 4. Acidez activa (pH en CaCl₂), CTC potencial, materia orgánica (M.O.) y saturación de bases (V) en el suelo en función de los manejos "SAF" o "Testigos", en las cuatro áreas. Área 1: SAF sin REM. Áreas 2, 3 y 4: SAF con REM. Valores correspondientes al promedio de dos muestreos en diferentes épocas en cada área. Los promedios (\pm error estándar del estudio) seguidas por una misma letra, dentro de cada área, no difieren entre sí por la prueba de Tukey al 5% de probabilidad de error. C1: SAF con REM vs Testigos. Effect Size de Cohen (d).

contenidos de materia orgánica en el suelo (Figura 4), sugiriendo que los altos aportes de biomasa al suelo son muy rápidamente degradados por la microbiota del suelo en las condiciones tropicales. Este hecho, aunque distinto del reportado en otras investigaciones con SAF (Albrecht y Kandji, 2003), refuerza la importancia de almacenar C en la biomasa viva de los agroecosistemas. Además, debe mencionarse que este resultado retrata muestras de suelo recogidas debajo de la arpillera, lo que refleja, en cierta medida, que la formación de la materia orgánica en el suelo es un proceso más lento que la descomposición y el consumo de los materiales añadidos por las podas.

Considerando el efecto conjunto (análisis multivariado) de las principales variables de suelo afectadas por los predictores en estudio, los SAF con REM afectaron positivamente la calidad química del suelo (Figura 5). Sin embargo, el SAF del Área 1 (sin adición de remineralizador) presentó comportamiento inverso (Figura 5). Este hecho refuerza la importancia del manejo de la fertilidad del suelo también con fuentes minerales en sistemas agroforestales. Adicionalmente, los REM se presentan como otra opción a ser integrada a las prácticas de manejo de los sistemas agroecológicos de producción (Carvalho et al., 2018).

Al analizar el promedio de las tres especies-claves de los sistemas, se observa que los SAFs 2, 3 y 4 presentaron mayor DAP que el SAF del área 1 en la última etapa evaluada (Figura 6B). Este hecho refuerza el efecto positivo

de los remineralizadores en la promoción del crecimiento de las plantas, posiblemente en función de las mejoras promovidas en el suelo (Figura 5). En la mayoría de los casos, el uso de REM puede no sólo contribuir al secuestro de CO₂ atmosférico (debido a la mayor oferta de multinutrientes, solubilizados a partir de los procesos de biolixiviación/intemperismo, donde los cationes liberados por las rocas se estabilizan por aniones carbonato) el incremento en las tasas fotosintéticas de las plantas.

A pesar de que la comparación estadística está restringida a la escala de puestos presentada en la Figura 6, a modo de información complementaria, se puede observar que hubo un mayor promedio en porcentaje de crecimiento del DAP para los individuos de *Persea americana*, en el SAF 2, con un crecimiento del 71,7% del diámetro del tallo (datos no mostrados). El SAF 3 tuvo una variación del 33,9% seguido por el SAF 4 y el SAF 1, con el 27,6% y el 14,8% de crecimiento del DAP, respectivamente. El *Dipteryx alata* (SAF 4) creció un 37,4%. El *Coffea* sp. se desarrolló mejor en el SAF 3 (78,3%), seguido del SAF 2 y el SAF 1, con 50,4 y 27,3%, respectivamente. El *Eucalyptus* spp., presente en los SAF 2 y 3 aumentó el DAP en el 37,6% y el 27,6%, respectivamente. En el SAF 1 el *Artocarpus heterophyllus* creció el 22,5% y el *Hymenaea* sp., en el SAF 4, el 27,5% (datos no mostrados).

Destacamos que las especies analizadas en esta investigación están recomendadas para su uso en sistemas

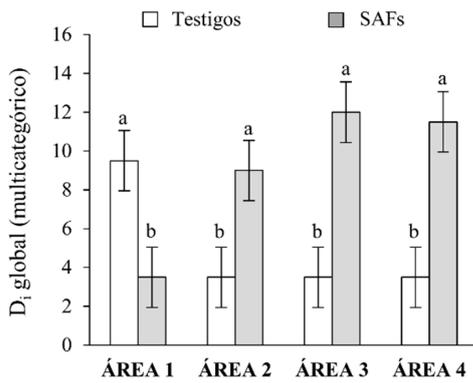


Figura 5. A Puestos del índice global Desirability de los parámetros P, K, S, Ca, Mg, B, Mn y pH del suelo en función de los manejos "SAFs" o "Testigos" en cuatro áreas de estudio. Área 1: SAF sin REM. Áreas 2, 3 y 4: SAF con REM. Valores correspondientes al promedio de dos muestreos en diferentes épocas en cada área. Los promedios (± error estándar del estudio) seguidas por una misma letra, dentro de cada área, no difieren entre sí por la prueba de Tukey al 10% de probabilidad de error.

en el centro de Brasil. Incluimos plantas de crecimiento rápido en el análisis, ya que aceleran la producción de biomasa para ser incorporadas al sistema. Los árboles de crecimiento lento, por otro lado, se comportan como sumideros constantes de CO₂ atmosférico ya que tienen ciclos de desarrollo más largos, extendiendo el proceso de captura y almacenamiento de CO₂.

Fue posible determinar que la amplitud entre el DAP de un SAF para el otro, o incluso dentro del mismo SAF, está relacionado a la calidad del suelo, a los tratos culturales, a la especie vegetal, al material genético, a la insolación, a incidentes (como quiebra en el manejo de la poda), además de la época de plantío. Con excepción del *Coffea* sp (que tuvo algunos individuos sin ganancia de DAP), todas las demás especies monitoreadas presentaron un desarrollo positivo en cuanto al crecimiento. En cuanto al *Dipteryx alata*, la *Persea americana* y el

Hymenaea sp., que son especies secundarias/clímax, ya se esperaba un crecimiento más lento que el *Eucalyptus* spp. y el *Artocarpus*.

Los valores promedio de biomasa arbórea (BA), existencias de carbono (CE) y dióxido de carbono secuestrado (CS) observados en el periodo de enero a octubre de 2017 en las tres especies estudiadas se muestran en la Tabla 4.

Los factores, que posiblemente influyeron en los resultados relacionados con el desarrollo/crecimiento de las especies, pueden estar vinculados a la forma de manejo, así como a los aspectos de instalación de las áreas. El conjunto de resultados obtenidos permite sugerir que la ausencia de fertilización mineral fue el principal factor de desempeño menos significativo verificado en el SAF 1, cuando fue comparado con los otros tres que recibieron estos materiales.

Estos resultados concuerdan con la teoría de la trofobiosis, defendida por Chaboussou (1987), que sugiere que la nutrición con productos naturales no permite la liberación de nutrientes en exceso y su consiguiente almacenamiento en los tejidos de las plantas. La solubilidad más baja de los materiales geológicos, derivados de los polvos de roca (REM), determina una disponibilidad de los nutrientes más lenta, posiblemente más cercana a la velocidad de demanda de los árboles.

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación e incorporándolos a los principios de la agroecología, se considera que este enfoque se consolida como un método científico en la medida en que este campo de conocimiento se nutre de otras disciplinas y de experiencias empíricas de los agricultores, lo que permite el establecimiento de marcos conceptuales, metodológicos y estratégicos, con mayor capacidad para orientar, no sólo el diseño y manejo de agroecosistemas, sino también procesos de desarrollo rural sustentable. Los resultados positivos, aliados a las observaciones de los propietarios de las áreas estudiadas con relación a las características del suelo que según testimonio se hizo: (i) más oscuro, (ii) con un significativo aumento del número de lombrices, insectos y otros organismos de pequeño y

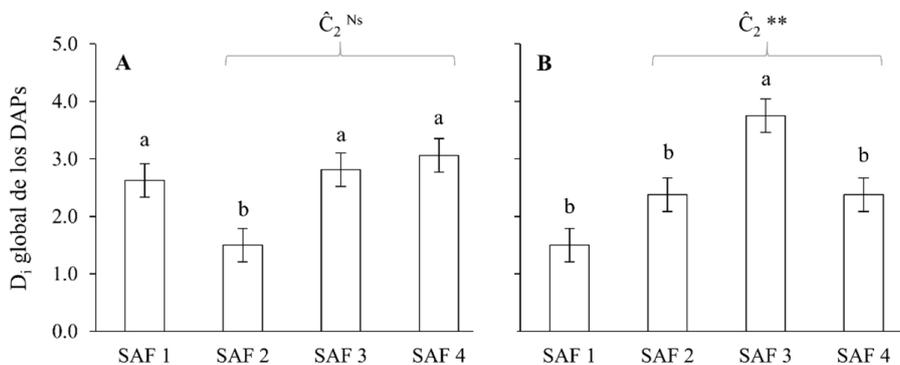


Figura 6. Puestos del índice global "Desirability" (Di) de los diámetros de las especies arbóreas evaluadas (*Persea americana*, *Coffea* sp., *Eucalyptus* spp., *Artocarpus heterophyllus*, *Dipteryx alata* y *Hymenaea* sp.) en los diferentes SAF estudiados (SAF 1: sin REM; SAF 2, 3 y 4: con REM), en enero (A) y octubre (B) de 2017. Promedios (± error estándar del estudio) seguidos por una misma letra, dentro de cada área, no difieren entre sí por la prueba "SNK on ranks" al 5% de probabilidad de error. C₂: SAF con REM vs SAF 1.

Tabla 4. Valores medios de BA, EC (kg pl⁻¹) y CS (Kg CO₂ pl⁻¹) acumulados en 10 meses.

	Especie	BA (kg pl ⁻¹)	EC (kg C pl ⁻¹)	CS (kg CO ₂ pl ⁻¹)
SAF 1	Aguacate	35.53	17.76	65.197
	Café	0.40	0.20	0.73
	Yaca	39.12	19.56	71.79
SAF 2	Aguacate	7.03	3.515	12.91
	Café	0.45	0.22	0.83
	Eucalipto	54.18	27.09	99.43
SAF 3	Aguacate	19.75	9.87	36.24
	Café	1.05	0.52	2.41
	Eucalipto	29.14	14.57	53.48
SAF 4	Aguacate	8.31	4.15	15.24
	Barú	16.98	8.49	31.15
	Jatoba	9.92	4.96	18.20

mediano tamaño, (iii) así como la disminución del número de gusanos, el ataque de plagas y enfermedades), se suman a favor de prácticas y/o rutas tecnológicas menos impactantes, pero también capaces de generar beneficios ambientales, incluyendo las medidas relacionadas con el cambio climático (Theodoro y Leonardos, 2021).

Consideraciones finales

En esta investigación se hizo un análisis de la asociación de la práctica agroforestal con los principios de la tecnología del "Rochagem" en lo que se refiere a la calidad del suelo, el desarrollo arbóreo y la posible retención de CO₂, en un sistema agroforestal implementado en áreas de fincas pequeñas y medianas. Se buscó contribuir con el entendimiento acerca de los aspectos nutricionales del suelo, relativos a su evolución y su desarrollo, bajo el uso de SAF en las áreas analizadas. La principal hipótesis de que el uso de REM (adicionados en la implantación de las áreas de SAF) ampliaría la oferta de nutrientes a lo largo del tiempo fue confirmada, aunque se considere que los tratamientos culturales y la cantidad de materia orgánica disponible en cada sistema puede haber contribuido con los resultados positivos. Los datos revelados por los análisis permitieron averiguar que los remineralizadores tuvieron un efecto potenciador en las tres áreas que recibieron ese insumo en su implantación, una vez que hubo alteración más destacada en la química del suelo, lo que, en principio, potenció el crecimiento vegetal y, consecuentemente, la captura de CO₂ atmosférico.

Con relación a los macronutrientes (P, K, Ca y Mg) se verificó que la presencia de los REM afectó positivamente la disponibilidad de esos nutrientes, al ser comparado

con sus respectivos testigos, en especial los contenidos de P y K en el suelo, que presentaron promedios mayores en las áreas 2, 3 y 4, donde la fertilización con REM estuvo presente.

Con respecto a las tasas de crecimiento de las tres especies claves de los sistemas, se puede también verificar que los mayores DAPs fueron encontrados en los SAF 2, 3 y 4, lo que refuerza el papel de los REM como una fuente importante de multinutrientes, ya que favoreció un desempeño más expresivo de las plantas. El crecimiento más expresivo de las especies claves en esas áreas, implicó el incremento de las tasas fotosintéticas de las plantas, contribuyendo así al secuestro de CO₂ atmosférico.

Aunque el estudio se desarrolló en áreas bajo la gestión de agricultores familiares, los resultados alcanzados proporcionan indicadores sobre la sostenibilidad de la agricultura de pequeño y mediano porte, en el ámbito de las propiedades rurales, lo que aumenta las posibilidades de contribución, de forma efectiva, con ajustes y nuevos parámetros para las políticas de Cambio Climático relativas a la captura de CO₂.

Bibliografía

- Albrecht A, Kandji ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 99, 15-27. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00138-5)
- Altieri MA, Funes-Monzote FR, Petersen P. 2012. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development*, 32: 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6>

- Arevalo LA, Alegre JC, Vilcahuaman LM. 2002. Metodologia para estimar estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra. Colombo: Embrapa Florestas, Doc 73,
- Asare R, Afari-Sefa V, Osei-Owusu Y, Pabi O. 2014. Cocoa agroforestry for increasing forest connectivity in a fragmented landscape in Ghana. *Agroforest Systems*, 88:1143–1156. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9688-3>
- Botkin DB, Keller EA. 2011. *Ciência Ambiental*. Rio de Janeiro: LTC. 702p.
- Brasil - Lei nº 12.854 de 26/10/2013 https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12890.htm (Consultado 22 Março 2021).
- Carvalho AMX, Cardoso IM, Souza MEP, Theodoro SH. 2018. Rochagem: o que se sabe sobre essa técnica? In: Cardoso IM, Fávero C. Solos e Agroecologia. Ed. Embrapa. Brasília. ISBN: 978-85-7035-774-8 p 101 -128. ISBN: 978-85-7035-774-8.
- Carvalho AMX, Mendes FQ, Mendes FQ, Tavares LF. 2020. Speed Stat: a free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 20(3): e327420312. <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3s46>
- Chaboussou F. 1987 *Plantas Doentes pelo Uso de Agrotóxicos: A teoria da Trofobiose*. Porto Alegre: L&PM.
- Churchman GJ, Singh M, Schapel A, Sarkar B, Bolan N. 2020. Clay minerals as the key to the sequestration of carbon in soils. *Clays and Clay Minerals*, 68, 135–143. <https://doi.org/10.1007/s42860-020-00071-z>
- Cohen J. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2nd Ed. New York: Academic Press, 474p.
- Conover WJ. 2012. The rank transformation - an easy and intuitive way to connect many nonparametric methods to their parametric counterparts for seamless teaching introductory statistics courses. *WIREs Computational Statistics*, 4: 432-438.
- Embrapa. 2013. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3º ed. RJ: Embrapa Solos,
- Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA, Cassidy ES, Gerber JS, Johnston M, Mueller ND, O'Connell C, Ray DK, West PC, Balzer C. 2001. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337–342 <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change .2018. *Global Warming Of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways (World Meteorological Organization)*. Acessado em 20/09/2020
- INMET - Instituto Nacional de Meteorología. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa disponível em <http://www.inmet.gov.br>. Acessado em 20/10/2020.
- King KF, Chandler NT. 1978. *The wasted lands: The program of work of the International Council for Research in Agro forestry (ICRAF)*. Nairobi, Kenya.
- Kothandaraman S, Dar JA, Sundarapandian S. *et al.* 2020. Armazenamento de carbono em nível de ecossistema e suas ligações com a diversidade, fatores estruturais e ambientais em florestas tropicais de Western Ghats, Índia. *Sci Rep* 10, 134. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70313-6>
- Leonardos OH, Fyfe WS, Kronberg BI. 1976. Rochagem: O método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. *Anais 29 Congr. Brasil. Geologia*, BH.
- Lorenzi H. 2009. *Arvores Brasileiras*. Editora Plantarum. ISBN-13: 9788586714146
- Manning DAC, Theodoro SH. 2020. Enabling food security through use of local rocks and minerals. *The Extractive Industries and Society*, 7. 480-487. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.002>
- Nair PKR, Nair VD, Kumar MB, Haile SG. 2009. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environ Sci Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.01.010>
- Paludo R, Costabeber JA. 2012. Sistemas agrofloretais como estratégia de desenvolvimento rural em diferentes biomas brasileiros. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 7, n. 2.
- Ramos CG, Hower JC, Blanco E, Oliveira MLS. Theodoro SH. 2021. Possibilities of using silicate rock powder: An overview. *Geoscience Frontiers*. ISSN 1674-9871. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>
- Rangel OJP, Silva CA. 2007. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasil. de Ciênc. do Solo* 31: 1609-1623.
- Rügnitz MT, Chacón ML, Porro R. 2009. *Guia para Determinação de Carbono em Pequenas Propriedades Rurais- 1a ed.- Belém, Brasil.: Centro Mundial Agroflorestral (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA)* 81p.
- Soares G. 2018. *A contribuições dos sistemas agrofloretais para a captura de CO₂ e para a melhoria da qualidade do solo: estudo de caso em áreas do cerrado*. Tesis de maestria. PPG-MADER/UnB. Brasil. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/33088?locale=en>
- Srivastava P, Singh R, Tripathi S, Raghubanshi AS. 2016. An urgent need for sustainable thinking in agriculture - an Indian scenario. *Ecological Indicators* 67: 611-622.
- Theodoro SH, Leonardos OH. 2021. *The Unsustainable Sustainability*. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, 93(1) <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120181226>
- Theodoro SH, Leonardos OH. 2015. Stonemeal: principles, potential and Perspective from Brazil. *In:*

Goreau TJ, Larson RW, Campe J. Geotherapy: Innovative methods of soil fertility restoration, carbon sequestration and reversing CO₂ increase. CRC Press. USA. 403-418. ISBN: 978-1-4665-9539-2

Theodoro SH, Medeiros FP, Ianniruberto M, Jacobson TKB. 2020. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. *J. S. Am. Earth Sci.* 103014. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103014>

Theodoro SH. 2000. A Fertilização da Terra pela Terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural. Tesis de Doctorado. Universidade de Brasília (CDS/UnB). <https://repositorio.unb.br/handle/10482/20881> .

Tilman D, Kenneth GC, Matson PA, Polasky RNS. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature.* 418, 671–677 <https://doi.org/10.1038/nature01014>