

**INTERACCIONES, COMPENSACIONES Y SINERGIAS ENTRE SERVICIOS
ECOSISTÉMICOS EN CULTIVARES DE PLÁTANO, EJE CAFETERO
COLOMBIANO**

LUIS FERNANDO ZULUAGA ZABALETA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN AMBIENTAL
PEREIRA
2017**

**INTERACCIONES, COMPENSACIONES Y SINERGIAS ENTRE SERVICIOS
ECOSISTÉMICOS EN CULTIVARES DE PLÁTANO, EJE CAFETERO
COLOMBIANO**

LUIS FERNANDO ZULUAGA ZABALETA

**TRABAJO DE GRADO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE ADMINISTRADOR AMBIENTAL**

**DIRECTOR
ALEXANDER FEJOO MARTÍNEZ, PhD**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN AMBIENTAL
PEREIRA
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL DIRECTOR

JURADO

JURADO

PEREIRA, JUNIO DE 2017

DEDICATORIA

A mis padres por todo el apoyo, amor, consejo y aliento que me han brindado siempre, por su motivación durante mi proceso de formación académica y por fortalecer mi anhelo de crecer como persona. Por inculcarme los valores y los principios de esfuerzo, compromiso y dedicación para lograr mis propósitos y ser el motor que me alienta cada día.

A mis hermanos, Mari y Rafael y mi tía Cecilia por sus palabras de aliento, su motivación e interés en mi crecimiento personal y profesional.

A Daniela López, por su constante motivación, deseo y aliento para cumplir mis metas, por su colaboración, compañía, consejo y paciencia. Por impulsarme a ser una mejor persona, creer en mis capacidades y hacer de mi paso por la universidad, una experiencia maravillosa.

A cada uno de mis profesores y compañeros del programa que durante el proceso de formación aportaron de una u otra manera a fortalecer mi capacidad de trabajo en equipo y a motivarme para ser un excelente profesional. Por compartir la increíble experiencia de aprender a vivir y disfrutar la universidad.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto “Servicios ecosistémicos generados por diversos arreglos del cultivo de plátano en el Eje Cafetero Colombiano” desarrollado por el Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos – GATA y coordinado por el docente e investigador Alexander Feijoo Martínez. A cada uno de los agricultores y sus familias quienes con sus experiencias, motivaciones y saberes marcaron el desarrollo de este proyecto.

A mi director Alexander Feijoo Martínez por su constante orientación, consejo, apoyo y dedicación en la realización de mi trabajo. Por confiar en mis capacidades y por alentarme a ser un excelente profesional, por fortalecer mi interés en la investigación y por compartir su vasta experiencia para enriquecer mi trabajo.

A la profesora María Constanza Zúñiga, por sus palabras de aliento y motivación para vincularme con el grupo GATA. Por su colaboración, carisma y confianza depositada en mí.

A la profesora Ligia Janeth Molina de la Universidad del Quindío, por su acompañamiento, consejo, apoyo y colaboración durante mi proceso investigativo. Por compartir su experiencia en el campo de la investigación y fortalecer el desarrollo del proyecto.

Al semillero de investigación en Planificación Socioecológica del Paisaje y sus integrantes, Alejandra Gómez, Alejandra López, Andrés Cardona, Beatriz Murillo, Daniela Giraldo, Daniela López, Jorge Correa y Stefanía Giraldo, por su apoyo durante el proceso investigativo, la realización del trabajo de campo y sus contribuciones al proyecto.

A Luisa Fernanda Arango, compañera de trabajo, por sus aportes en la realización y edición del documento.

CONTENIDO

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	9
1. OBJETIVOS	11
1.1. Objetivo general	11
1.2. Objetivos específicos.....	11
2. METODOLOGÍA.....	11
2.1. Área de estudio.....	11
2.2. Biodiversidad, servicios hidrológicos y estabilidad del suelo, provisión de nutrientes y producción de biomasa.....	15
2.3. Caracterización de las prácticas de manejo en los arreglos de cultivo.....	16
2.4. Interacciones entre Servicios Ecosistémicos.....	17
2.5. Análisis de datos.....	18
3. RESULTADOS.....	19
3.1. Evaluación de la biodiversidad, servicios hidrológicos y estabilidad del suelo, provisión de nutrientes y producción de biomasa	19
3.2. Prácticas de manejo en los arreglos de cultivo	24
3.3. Compensaciones, sinergias e interacciones neutrales entre SE.....	27
4. DISCUSIÓN	31
4.1. Variables claves para la cuantificación de servicios ecosistémicos de aprovisionamiento y regulación	31
4.2. Tendencias de las prácticas de manejo.....	35
4.3. Interacciones entre servicios ecosistémicos y su relación con las prácticas de manejo.....	40
CONCLUSIONES	44
REFERENCIAS.....	45

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los 33 predios evaluados en el departamento del Quindío, Colombia... 14	14
Figura 2. Vista tridimensional de la metodología de muestreo adaptada de Anderson y Ingram, 1993..... 15	15
Figura 3. Tendencias de las prácticas de manejo sobre los SE..... 39	39

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Variables asociadas con la biodiversidad y la producción de biomasa con diferencias significativas entre arreglos de cultivo 20	20
Tabla 2. Variables asociadas con servicios hidrológicos y estabilidad del suelo con diferencias significativas entre arreglos de cultivo 22	22
Tabla 3. Variables asociadas con la provisión de nutrientes con diferencias significativas entre arreglos de cultivo..... 22	22
Tabla 4. Variables asociadas con la producción de biomasa con diferencias significativas entre arreglos de cultivo..... 23	23
Tabla 5. Variables y servicios ecosistémicos seleccionados para el análisis de interacciones..... 24	24
Tabla 6. Descripción de las prácticas de manejo desarrolladas en los arreglos de cultivo de plátano. Elaboración propia. 25	25
Tabla 7. Coeficientes de correlación de Spearman y probabilidades en el arreglo Tradicional Arbóreo (TA) 27	27
Tabla 8. Coeficientes de correlación de Spearman y probabilidades en el arreglo Asociado con Aguacate y otros frutales (AA)..... 28	28
Tabla 9. Coeficientes de correlación de Spearman y probabilidades en el arreglo Asociado con Café (AC)..... 29	29
Tabla 10. Coeficientes de correlación de Spearman y probabilidades en el arreglo Monocultivo (MONO)..... 30	30

RESUMEN

Los ecosistemas han sufrido constantes alteraciones desde que el hombre hace uso de los servicios que estos sistemas proveen. Las acciones de gestión y manejo de los recursos han sido enfocadas principalmente hacia el incremento de la provisión de bienes y recursos tangibles que ofrecen los ecosistemas para abastecer las necesidades del mercado. Sin embargo, las decisiones que se toman en torno al manejo de los Servicios Ecosistémicos (SE) en la mayoría de casos no tienen en cuenta las múltiples interacciones que se dan entre servicios. En el presente estudio se documentaron las interacciones, compensaciones y sinergias entre seis servicios ecosistémicos de regulación y tres servicios de aprovisionamiento generados en cuatro arreglos de cultivares de *Musa paradisiaca* en 33 fincas del departamento de Quindío, Colombia. La caracterización se realizó mediante análisis de correlación y según los límites propuestos por la literatura. Se lograron identificar variaciones en el tipo de interacciones entre SE de acuerdo con cuatro arreglos de cultivo i) Tradicional arbóreo, ii) Asociado con Aguacate, iii) Asociado con café y iv) monocultivo. Se observó mayor cantidad de compensaciones en el monocultivo mientras que las sinergias fueron mayores en el asociado con aguacate. Al respecto, se encontró que las prácticas agronómicas como el manejo de arvenses, la aplicación de fertilizantes químicos y el control de plagas y enfermedades por métodos químicos alteran principalmente las interacciones entre los servicios de regulación de estabilidad y soporte físico, transporte y drenaje, el balance de nutrientes y los servicios asociados con la presencia y actividad de macroinvertebrados.

Palabras clave: Correlación, Manejo agroecológico, *M. paradisiaca*, servicios aprovisionamiento, servicios regulación.

ABSTRACT

The ecosystems have suffered constant alterations since the man does use of the services that these systems provide. The actions of management and handle of the resources have been focused mainly to the increase of the provision of goods and tangible resources that offer the ecosystems to resupply the needs of the market. However, the decisions that take around the handle of the Ecosystem Services (ES) in the majority of cases do not take into account the multiple interactions that give between services. In the present study, we documented the interactions, compensations and synergies between six regulation ecosystem services and three regulation services generated in four arrangements of cultivated of *Musa paradisiaca* in 33 farms of the department of Quindío, Colombia. The characterization realized by means of analysis of correlation and according to the limits proposed by the literature. It was possible to identify variations in the type of interactions between in accordance with four arrangements of crop i) Traditional arboreal, ii) Associated with Avocado, iii) Associated with coffee and iv) monoculture. It was observed greater quantity of compensations in the monoculture whereas the synergies were greater in the associated with avocado. In this regard, it was found that agronomic practices such as the management of weeds, the application of chemical fertilizers and the control of pests and diseases by chemical methods

mainly alter the interactions between the service of regulation of stability and physical support, transport and drainage nutrient balance and services associated with the presence and activity of macroinvertebrates.

Key words: Correlation, Agroecological management, *M. paradisiaca*, provisioning services, regulation services.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo las sociedades humanas han desarrollado nuevas formas de obtener bienes y servicios de la naturaleza. Estos beneficios que el hombre recibe de su entorno son los Servicios Ecosistémicos (SE), entendidos como procesos de los ecosistemas los cuales además de proveer alimento y madera también regulan la calidad del agua y del aire (Ehrlich y Ehrlich, 1992) y son utilizados de manera activa o pasiva para el bienestar de las poblaciones (Fisher *et al.*, 2009).

Millennium Assessment Ecosystem (MA) (=Evaluación de Ecosistemas del Milenio, EEM, en español) (MA, 2003) ha clasificado los SE en cuatro categorías: Servicios ecosistémicos de soporte, necesarios para la producción de otros SE; de aprovisionamiento, asociados con los recursos proveídos por los ecosistemas; de regulación, beneficios obtenidos de la regulación de los ecosistemas y los culturales, relacionados con los beneficios no materiales o intangibles (Valdez y Ruiz, 2011).

De acuerdo con MA (2005a) uno de los grandes problemas sobre el manejo de los SE a nivel mundial es que el 60% (16 de 24) están siendo degradados o utilizados insosteniblemente, incluyendo el abastecimiento de agua potable, regulación de la calidad del aire, regulación del clima, la fertilidad y productividad de los suelos. Lo anterior puede ser entendido según Rodríguez *et al.* (2006) como resultado de modificaciones en la oferta de algunos servicios para aumentar deliberadamente la producción de un bien o servicio particular. Los intentos por optimizar un único SE, generalmente de aprovisionamiento, a menudo ocasionan pérdidas o reducciones en la provisión de otros (Bennett *et al.*, 2009) como en el caso de los servicios de regulación asociados, por ejemplo, con la calidad del agua y del suelo.

La influencia que tiene un servicio sobre la provisión de otro es lo que se conoce como interacción, es decir, existe una relación entre servicios ecosistémicos que puede darse de diferentes maneras. Para Bennett *et al.* (2009) las interacciones suceden cuando múltiples servicios responden ante el mismo conductor de cambio (*driver*) o cuando las interacciones entre los mismos servicios causan cambios en otro al alterar su provisión.

Una de las formas posibles de comprender si existe o no relación entre SE es a través de la identificación de los tipos de interacciones. Entre ellos se encuentran las *tradeoffs* (=compensaciones, en español) y suceden cuando la provisión de un servicio es incrementada al

reducirse la provisión de otro. Por ejemplo, cuando se aumenta deliberadamente la fertilidad de un agroecosistema intensificando el uso del suelo para la obtención de alimentos (SE de aprovisionamiento), disminuye la capacidad de infiltración en el suelo y por lo tanto incrementa el nivel de escorrentía, lo que se traduce en la afectación al servicio de control de la erosión (SE de regulación).

Las *sinergias*, se presentan cuando múltiples servicios incrementan o disminuyen simultáneamente su provisión, como en el caso del aumento de la productividad agrícola generado por la mayor disponibilidad de materia orgánica o de captura de carbono en el suelo. De esta forma, ambos servicios ecosistémicos se benefician ante la influencia de un conductor de cambio que puede ser por ejemplo, un periodo extenso de sequía (Bennett *et al.*, 2009). Cuando el incremento en la provisión de un servicio no afecta ni positiva ni negativamente a otro se dice que la interacción es de tipo *neutral*, por lo tanto, no se ven alterados ante la presencia de un generador de cambio. Según Rodríguez *et al.* (2006) tanto las compensaciones como las sinergias pueden ser manejadas para reducir los costos que representan para la sociedad y el bienestar de los ecosistemas. Aun así, las compensaciones críticas presentadas entre SE cuya influencia se refleja a escalas temporales o espaciales amplias, generalmente reciben menor atención de los gobiernos en países en vía de desarrollo puesto que la conservación de ecosistemas pasa a ser un tema menos relevante en comparación con la creciente necesidad de disminuir la pobreza por los medios más rápidos posibles.

La comprensión sobre las relaciones entre SE es deficitaria (Carpenter *et al.*, 2009) y, las decisiones en las escalas global y nacional, resultan en el incremento de las compensaciones y la disminución de las sinergias entre servicios, lo que finalmente genera consecuencias para el bienestar humano. Esta situación puede evidenciarse en los paisajes del territorio Colombiano, en los cuales las coberturas y usos del terreno reflejan distintos tipos de interacción entre la sociedad y los ecosistemas; y en los que, generalmente se desarrollan actividades (agrícolas, pecuarias, productivas, urbanísticas) altamente tecnificadas, bajo métodos y prácticas insostenibles que alteran la dinámica natural de los ecosistemas y cuyos impactos pueden trascender a escalas temporales y espaciales cada vez mayores.

Entre dichos usos del terreno, los sistemas agrícolas ganan importancia por su capacidad de generar SE, pero además por las fuertes transformaciones del paisaje que implica su desarrollo. A su vez, en relación con los sistemas de cultivar, el cultivo del plátano ocupa el cuarto lugar en importancia para Colombia, por tratarse de un alimento básico y de exportación, fuente de empleo e ingresos en numerosos países del trópico y subtropico (DANE, 2014). En el caso colombiano, se constituye como actividad tradicional de la economía campesina, por ser llevada a cabo principalmente por pequeños productores; por su amplia dispersión geográfica, por el valor socioeconómico en la seguridad alimentaria y por la generación de empleos (MADR, 2005), el valor cultural que representa para las familias productoras, entre otras. Las anteriores, son algunas de las razones por

las cuales es considerado como fuente generadora de diversos SE para las comunidades quienes lo desarrollan.

El departamento del Quindío es el tercer productor de plátano en el ámbito nacional, a su vez el municipio de Armenia ocupa el primer puesto en producción a nivel departamental; condición por la que fue seleccionado como área de estudio para el desarrollo del presente trabajo investigativo. Conjuntamente, el sistema se cultiva en arreglos que van desde sistemas tradicionales, asociados con café o aguacate hasta sistemas intensificados como monocultivos.

El estudio, se propuso como hipótesis que los arreglos de cultivo alteran diferencialmente los servicios ecosistémicos en sinergia con el tipo de las prácticas de manejo. Por lo anterior, se propuso los siguientes objetivos:

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Documentar las interacciones, compensaciones y sinergias entre servicios ecosistémicos generados por los arreglos de cultivo de plátano en el Eje Cafetero Colombiano.

1.2. Objetivos específicos

Determinar las variables claves asociadas con servicios de aprovisionamiento y regulación en cuatro arreglos de cultivos de plátano.

Caracterizar las prácticas de manejo que afectan la provisión de los servicios ecosistémicos evaluados en los arreglos.

Evaluar las interacciones entre servicios ecosistémicos en cada arreglo de acuerdo con las categorías de compensación, sinergia y neutral y su relación con las prácticas de manejo.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El departamento del Quindío se ubica en la zona centro-occidental de Colombia, en el flanco Occidental de la Cordillera Central (4°44' y 4°04' N; 75°52' y 75°24' O). Cuenta con una extensión total de 1930,5 km². Limita al norte con el departamento de Risaralda, al oriente con el Tolima y al sur occidente con el Valle del Cauca. Está conformado por 12 municipios: Armenia, Circasia,

Filandia, Salento, Quimbaya, Calarcá, Montenegro, Córdoba, Buenavista, Pijao, Génova y La Tebaida (IGAC, 2013).

La zona de estudio se localizó en los municipios de Armenia, Circasia y Calarcá. El área comprendió la franja altitudinal entre los 1205 y 1588 metros sobre el nivel del mar. El clima es bimodal (dos períodos lluviosos y dos períodos secos), caracterizado por temperatura media anual que oscila entre 18 y 20.4° C, precipitación anual entre 2000 a 2200 mm anuales. El municipio de Armenia, cuenta con una superficie sembrada de 3.883 ha (14,7%) y una producción anual de 50.310 ton (13 ton/ha); Calarcá ocupa la posición número dos con un área sembrada de 3.685 ha (14,01%) y una producción de 36.000 ton al año (12 ton/ha) y, Circasia tiene 870 ha sembradas (3,31%) y participa con 5.743 ton al año (6,5 ton/ha) (Gobernación del Quindío, 2015).

Los suelos pertenecen al orden de los Andisoles, suborden Udands, que alberga suelos de régimen de humedad údico del grupo Hapludands en la Consociación El Cafetal Typic Hapludands. En general se caracterizan por ser suelos originados a partir de cenizas volcánicas o depósitos torrenciales volcánicos, son profundos, bien drenados, con acidez ligera a moderada y de fertilidad moderada (IGAC, 2013).

La presente investigación se realizó en el marco del proyecto “*Servicios ecosistémicos generados por diversos arreglos del cultivo de plátano en el Eje Cafetero Colombiano*” (Feijoo et al., 2014) desarrollado por el Grupo de investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos (GATA) de la Universidad Tecnológica de Pereira, y financiado por COLCIENCIAS.

El proceso de selección de las fincas consistió en la revisión de la base de datos de la Secretaría de Agricultura Departamental del Quindío (2014), la cual cuenta con 319 registros de productores de plátano de los cuales se escogieron de manera preliminar 50 predios considerando la altura, el tipo de arreglo y el área cultivada. Posteriormente, se llevaron a cabo 13 salidas de campo a la zona rural de los municipios para lograr un primer acercamiento con los 50 agricultores y sus familias. Como criterios de selección, durante las visitas se indagó acerca de los estilos de hacer agricultura, la distribución de los usos del terreno en cada finca, las prácticas de manejo desarrolladas, el tiempo de permanencia del agricultor en la región, la altura sobre el nivel del mar con el propósito de situar las fincas en dos franjas (baja y alta) y el tipo de suelo.

Con la información recolectada, se seleccionaron 33 fincas ubicadas en los municipios de Armenia (28), Circasia (3) y Calarcá (2), Quindío (Figura 1), en las que se identificaron cuatro arreglos de cultivar teniendo en cuenta la clasificación del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) (2005): (i) **Tradicional Arbóreo (TA)**, plátano tradicional asociado con café tradicional y árboles dispersos, sin distancias ni trazos definidos, ni fertilización y pocas labores agronómicas (10 fincas); (ii) **Asociado con Café (AC)** Plátano asociado con café, en barreras con distancias definidas y manejo agronómico significativo (8 fincas); (iii) **Asociado con Aguacate y otros frutales (AA)** Plátano asociado con aguacate y otros frutales, con manejo agronómico permanente, seis años de siembra, sin trazos y resiembras frecuentes (8 fincas); (iv) **Monocultivo (MONO)**

Plátano monocultivo tecnificado, con manejo agronómico, trazo definido y renovación cada 5 a 6 años (7 fincas).

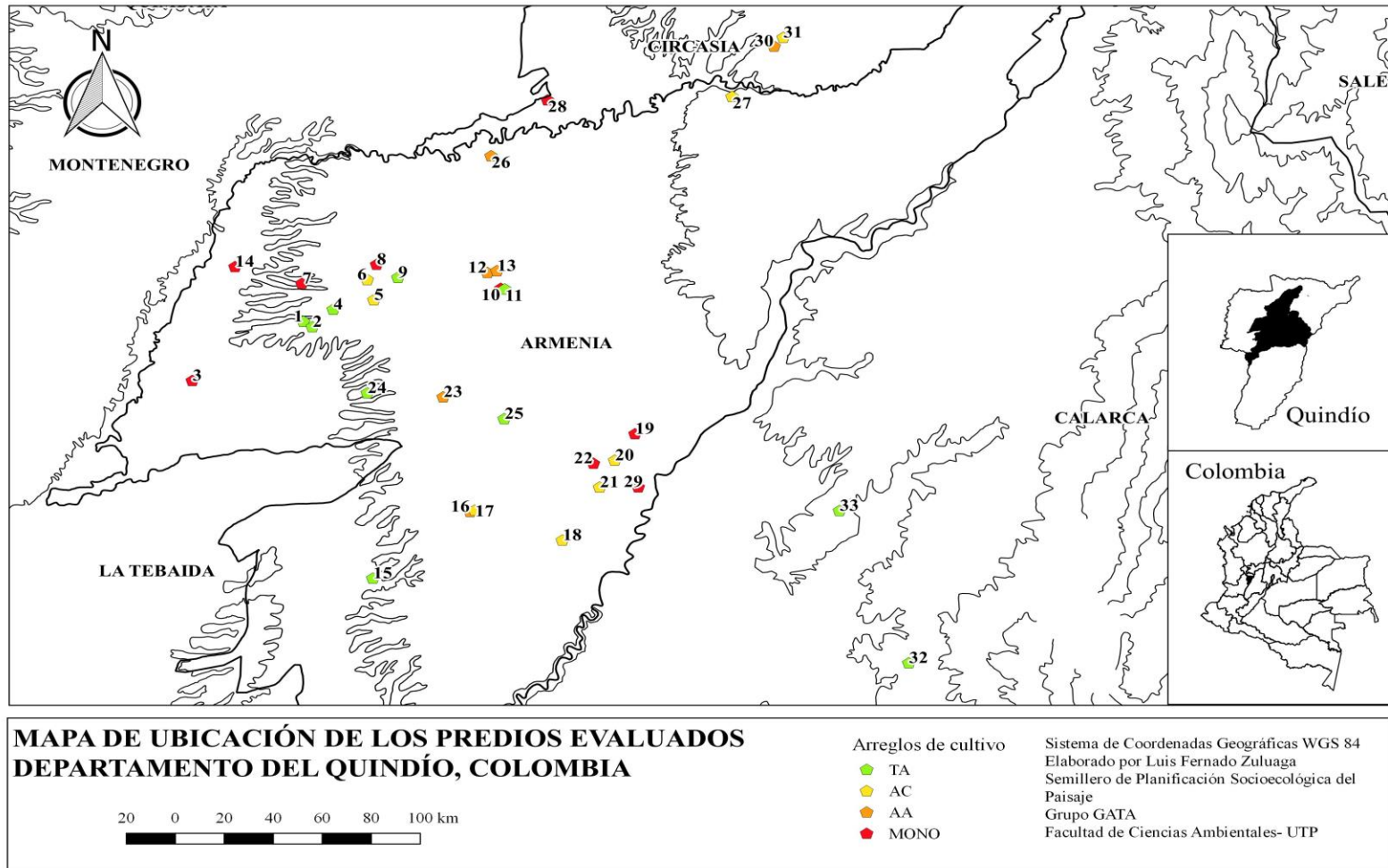


Figura 1. Ubicación de los 33 predios evaluados en el departamento del Quindío, Colombia. Elaboración: Autor.

2.2. Biodiversidad, servicios hidrológicos y estabilidad del suelo, provisión de nutrientes y producción de biomasa

2.2.1. Biodiversidad:

En 18 monolitos se colectaron las comunidades de macroinvertebrados del suelo de acuerdo con el método del Programa Fertilidad Biológica de Suelos Tropicales (TSBF) (Anderson y Ingram, 1993), a excepción de hormigas, abejas y termitas puesto que la presencia de colonias con cientos de individuos supone dificultades para el proceso de colecta y cuantificación. Se extrajeron tres monolitos por cada punto, uno principal de 30 x 30 x 20 cm con colecta en las profundidades de 0-10 y 10-20 cm; y dos complementarios de 30 x 30 x 10 cm, ubicados a 5 metros del monolito central en las direcciones Norte y Sur (Figura 2). El método fue adaptado a una profundidad máxima de 20 cm debido a que el sistema radicular del plátano es superficial, y la disponibilidad de nutrientes y presencia de macroinvertebrados se evidencia especialmente en esa franja del suelo. Los macroinvertebrados fueron fijados y conservados en alcohol al 70% a excepción de las lombrices de tierra las cuales fueron fijadas en alcohol al 96% para asegurar su correcta conservación. El material se identificó y cuantificó la abundancia (individuos.m⁻²) para cada finca y por arreglo del sistema de cultivar plátano.

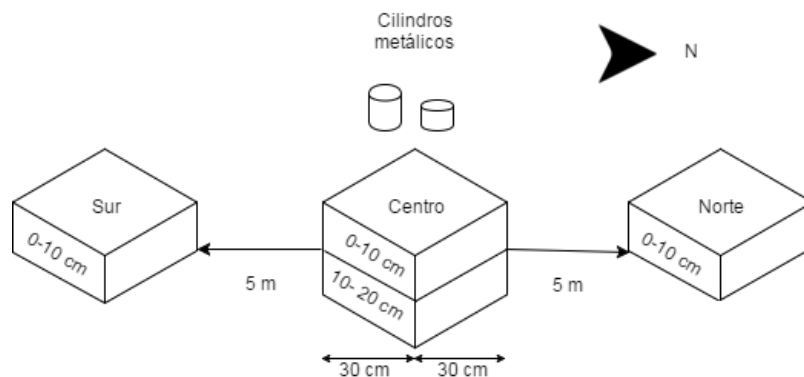


Figura 2. Vista tridimensional de la metodología de muestreo adaptada de Anderson y Ingram, 1993.

2.2.2. Servicios hidrológicos y estabilidad del suelo.

Se tomaron muestras de algunas variables de las propiedades físicas del suelo en 198 cilindros metálicos de 2,5 cm, para medir conductividad hidráulica y 198 cilindros de 5 cm para evaluar curvas de retención de humedad, humedades volumétrica y gravimétrica. Los cilindros fueron ubicados en cada uno de los 33 monolitos centrales utilizados en el muestreo de macroinvertebrados (Figura 2), y adicionalmente, en un área contigua al monolito se extrajo una muestra de 300 g de suelo para evaluar la estabilidad de agregados al agua (método de Yoder, 1936) con tamices de diámetro menor de dos mm (2, 2-1, 1-0.5, 0.5-0.25, 0.25-0.125). Se midieron

variables relacionadas con los procesos de infiltración, drenaje y fenómenos de adensamiento del suelo como densidad aparente (método de los cilindros), densidad real (método del picnómetro), microporos (<0.03 micras), mesoporos (0.003-3 micras) y macroporos (>3 micras). Las muestras fueron analizadas por el Dr. Jesús Hernando Galvis en el Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA en el municipio de Buga.

2.2.3. Provisión de nutrientes:

En la provisión de nutrientes del suelo se evaluaron 12 variables asociadas con la fertilidad del mismo (Anderson y Ingram, 1993). En los monolitos utilizados para muestrear la macrofauna se tomaron muestras de suelo a 0-10 cm y 10-20 cm de profundidad. Para lo anterior, se conformó una muestra de 800 g compuesta por los tres monolitos (N-C-S) a una profundidad de 0-10 cm. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Suelos de la Universidad del Quindío, en el procedimiento se secaron los suelos a 60°C y se determinó el contenido de materia orgánica (Walkley Black fotométrico), N (cálculo), fósforo (Bray II fotométrico), bases intercambiables (K, Ca, Mg, método Acetato de Amonio, Absorción Atómica), aluminio (extracción KCL, volumetría si pH<5.2), elementos menores (Fe, Mn, Zn, Cu, Acetato de Amonio + EDTA, Absorción Atómica), boro (Azometrina H fotométrico), azufre (extracción con fosfato monocálcico. Turbidimétrico), capacidad de intercambio catiónico, colorimetría), C (cálculo) y pH (potenciómetro en agua con relación 1:1).

2.2.4. Producción de biomasa:

Se extrajeron cinco plantas elegidas al azar en cada una de las fincas distribuidas por tipo de arreglo de cultivo. Las plantas escogidas fueron aquellas que estaban próximas a la cosecha (16 meses aproximadamente). En el momento de la cosecha de las cinco plantas, se midieron las variables de producción: peso bruto del racimo (kg), número de manos por racimo (unidad), número de dedos por racimo (unidad), longitud del fruto (cm, de los dedos centrales de la primera y tercera mano del racimo) y perímetro central del fruto (cm, de los dedos centrales de la primera y tercera mano del racimo).

Entre los cuatro juegos de variables evaluados, se seleccionaron nueve (9), de acuerdo con criterios estadísticos y en función de la sensibilidad que exhiben ante las prácticas de manejo desarrolladas en los arreglos de cultivo. Se definió el servicio ecosistémico de regulación o aprovisionamiento con el que contribuye cada variable con el propósito de realizar el análisis de interacciones por arreglo.

2.3. Caracterización de las prácticas de manejo en los arreglos de cultivo

Se describieron las prácticas de manejo más frecuentes en los arreglos, para definir el posible impacto positivo, negativo o neutro en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y evaluar su posible relación con los servicios ecosistémicos. La información en las fincas se recolectó a partir de métodos etnográficos tales como diálogos, entrevistas semi-estructuradas con los agricultores, la familia y los administradores, y la redundancia en las indagaciones de acuerdo con el método de Zúñiga et al. (2013). Las prácticas correspondieron con la desinfección de colino y hoyo, la densidad de siembra, el embolsado tratado o no, tipo de control de arvenses, plagas y enfermedades, uso de plaguicidas, tipo y productos para fertilización y uso de enmiendas orgánicas.

Con las prácticas de manejo descritas, se asociaron los servicios de aprovisionamiento y regulación que son afectados directa e indirectamente por la alteración de las condiciones naturales del suelo. Se buscó identificar aquellas que permiten diferenciar los arreglos de cultivo según el tipo o intensidad de la práctica y, por ende, generan impacto diferenciado sobre la provisión de SE.

2.4. Interacciones entre Servicios Ecosistémicos

En la caracterización de interacciones se tuvo en cuenta el análisis entre SE, para lo cual se realizó el Análisis de correlación de Pearson (Jopke *et al.*, 2014), complementado con la generación de Bagplots, una versión bivariada de los boxplots (Rousseeuw, Ruts y Tukey, 1999). No obstante, debido a la naturaleza de los datos disponibles, y a fin de evitar la transformación de los mismos (lo cual supone inconvenientes al momento de interpretar y comparar resultados por la utilización de complejos algoritmos), se empleó el análisis de correlación con el método no paramétrico de Correlación por Rangos de Spearman (r), el que caracteriza las interacciones entre pares de SE de acuerdo con las tres categorías descritas por Jopke *et al.* (2014). El análisis se estructuró en dos pasos, el primero consistió en la identificación de las interacciones entre SE a nivel de arreglo de cultivo según tres patrones:

- i.* Sinergia: Las sinergias entre dos SE ocurren cuando se produce un incremento en la provisión de ambos servicios.
- ii.* Compensación: Ocurren cuando la provisión de un SE se incrementa a costo de la disminución de la provisión de otro.
- iii.* Neutral: La interacción entre dos SE se ajusta a esta categoría cuando el incremento en la provisión de un servicio no causa ningún impacto (aumento o disminución) en otro.

El procedimiento consistió en determinar el tipo de interacción que se presenta entre un servicio A y un servicio B de acuerdo con el grado de correlación (r_s) entre ambos. Al respecto, se acogió la propuesta de Lee y Lautenbach (2016) con los siguientes límites para la categorización: los

coeficientes r por encima de 0.25 fueron considerados como *Sinergias*; los coeficientes r menores a -0.25 como *Compensación* y a los coeficientes r con valores entre -0.25 y 0.25 se les categorizó como *Neutral*. Cabe mencionar que, como elemento importante en la categorización de las interacciones de S y T se consideraron dos niveles α : Correlaciones significativas a un nivel de 0.05 se les identificó como “*altamente significativa*” y a un nivel de 0.1 como “*significativa*”.

El segundo paso estuvo referido al cálculo del r_s acumulado ($r_{s\text{ acum}}$) (adaptado de Jopke *et al.*, 2014) para cada servicio ecosistémico (SE_i), considerando la clasificación por arreglos de cultivo. El valor correspondió con la suma de todos los pares de coeficientes de correlación (r) con los que el SE_i contribuye. Su interpretación se asoció con la cercanía al valor positivo para un SE específico, más sinergias o menos compensaciones tiene con los demás SE evaluados. Consecuentemente, el número y categoría de las interacciones para cada arreglo se identificó basándose en el r_s para cada SE_i con los demás SE.

2.5. Análisis de datos

Se revisaron 177 variables evaluadas en el sistema de cultivo del plátano, las cuales fueron sistematizadas en bases de datos elaboradas con Microsoft Excel©. Se agruparon en cuatro categorías para su análisis y tratamiento estadístico: asociadas con servicios hidrológicos y de estabilidad del suelo (25), provisión de nutrientes (12), biodiversidad (136) y producción (4). Los tamaños de muestra correspondieron con seis (6) puntos de muestreo en cada finca asociada con su respectivo arreglo de cultivo y se distribuyeron así: TA (n= 60), AA (n= 48), AC (n= 48) y MONO (n = 42).

Con el objetivo de identificar las variables clave a seleccionar, se establecieron los siguientes criterios:

- a) que las variables arrojaran diferencias significativas entre arreglos de cultivo ($p < 0.05$);
- b) Variables con valores p cercanos a 0.0001 tuvieron prioridad por presentar mayor heterogeneidad entre los tratamientos (arreglos de cultivo);
- c) que las variables seleccionadas no presentaran alta desviación estándar, para evitar altos niveles de varianza entre arreglos y;
- d) que las variables presentaran mayor sensibilidad y mostraran efectos de las prácticas de manejo de los arreglos de cultivar plátano en la dinámica de los servicios ecosistémicos de aprovisionamiento y regulación.

En los 17 taxa encontrados para las 33 fincas, se redujo el número debido a la baja presencia y alta variabilidad de algunos de ellos en los muestreos, para lo cual se agruparon en la categoría “Otros” los grupos cuya representación acumulada fuera inferior al 10% del total. Por tal razón, los grupos

evaluados fueron: Oligoquetos (48.7%), coleópteros (19.1%), miriápodos (14.5%), blattaria (5.6%), hemípteros (2.7%) (90,6%) y Otros (9.4%).

Se realizaron pruebas de Normalidad a las 47 variables cuantitativas. Con las variables normales se hizo Análisis de Varianza con un factor (ANAVA) y la prueba Post-hoc de Tukey, a las demás se les aplicó Análisis de Varianza No Paramétrico con la Prueba de Kruskal-Wallis debido a que no se ajustan a un modelo de distribución normal. Los tratamientos estadísticos fueron desarrollados con el Software Infostat v2016 (Di Rienzo *et al.*, 2016) y los Análisis de Correlación por Rangos de Spearman por arreglo se realizaron con el software STATISTICA 8 (StatSoft, 2007).

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación de la biodiversidad, servicios hidrológicos y estabilidad del suelo, provisión de nutrientes y producción de biomasa

En correspondencia con el análisis de varianza entre las variables asociadas con la biodiversidad solo se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los arreglos de cultivo en cuanto a la abundancia y biomasa de miriápodos (Tabla 1). Por tal motivo, ambas fueron seleccionadas para el análisis de interacciones entre SE ya que los demás grupos evaluados no cumplieron el primer criterio estadístico definido. El arreglo TA presentó los valores de abundancia y biomasa promedio de miriápodos más altos entre los cuatro arreglos (54.93 Ind.m⁻², 3.88 g.p.f.m⁻²) con una diferencia significativa de 37.6 individuos Ind.m⁻² y 2.85 g.p.f.m⁻² respectivamente, en comparación con el arreglo AC, el cual mostró el valor más bajo (17.33 Ind.m⁻², 1.03 g.p.f.m⁻²). Los valores de TA expresaron diferencias significativas en comparación con MONO que si bien mostró mayor abundancia (36.95 Ind.m⁻²) que el arreglo AA (31.33 Ind.m⁻²), su promedio en términos de la biomasa fue inferior en 0.38 g.p.f.m⁻² con respecto a AA (1.90 g.p.f.m⁻²) (Tabla 1).

A pesar de lo anterior, se consideró importante presentar los resultados obtenidos en los demás grupos taxonómicos a fin de dilucidar la participación de éstos en la biodiversidad de cada arreglo de cultivo. Por ejemplo, se encontró que entre los cuatro arreglos la abundancia y biomasa de Oligoquetos fue menor en TA (80.8 Ind.m⁻² y 20.43 g.p.f.m⁻²) y mayor en AA (180.67 Ind.m⁻² y 39.49 g.p.f.m⁻²) respectivamente. La mayor abundancia de coleópteros se registró en el arreglo AC (62.33 Ind.m⁻²) y la menor en AA (39.63 Ind.m⁻²), mientras que la biomasa del grupo fue superior en el arreglo MONO (12 g.p.f.m⁻²) e inferior en TA (7.28 g.p.f.m⁻²). A cerca de los demás grupos taxonómicos, se encontró que el arreglo AA presentó los valores más bajos en abundancia y biomasa de Blatarria (12.33 Ind.m⁻² y 2.74 g.p.f.m⁻²) y obtuvo el valor más alto en biomasa de Otros (3.35 g.p.f.m⁻²), mientras que el arreglo TA exhibió la biomasa más alta Blattaria (3.75 g.p.f.m⁻²). La abundancia y biomasa de Hemípteros fueron superiores en AA (15.67 Ind.m⁻² y 0.88 g.p.f.m⁻²) (Tabla 1).

Tabla 1. Variables asociadas con la biodiversidad y la producción de biomasa con diferencias significativas entre arreglos de cultivo: Tradicional Arbóreo (TA) n=60, Asociado con Café (AC) n=48, Asociado con Aguacate (AA) n=48 y Monocultivo (MONO) n=42.

Arreglo	Abun. Mir. (Ind.m ⁻²)	Biom. Mir. (g.p.f.m ⁻²)
TA	54.93 ± 80.86 ^c	3.88 ± 8.18 ^c
AC	17.33 ± 38.75 ^a	1.03 ± 2.43 ^a
AA	31.33 ± 45.37 ^{bc}	1.90 ± 3.94 ^b
MONO	36.95 ± 80.85 ^{ab}	1.52 ± 4.02 ^{ab}

Abundancia de miriápodos $p= 0.0002$; Biomasa de miriápodos $p= 0.0001$

*Letras semejantes indican que no hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre arreglos de cultivo.

**Se tomaron cinco muestras por finca= Tradicional Arbóreo (TA) n=50, Asociado con Café (AC) n=40, Asociado con Aguacate (AA) n=40 y Monocultivo (MONO) n=35.

Conforme con la evaluación del criterio de significancia ($p < 0.05$) mediante análisis de varianza, se lograron separar nueve (9) variables de 25 en total, las cuales se agruparon dentro de las categorías de servicios hidrológicos (porosidad total, conductividad hidráulica saturada, humedad volumétrica a 0 cm, humedad volumétrica a PMP, macroporos, microporos) y estabilidad del suelo (densidad aparente, densidad real, agregados estables al agua de tamaño entre 2 y 1 mm (=AEA 2-1 mm) y presentaron diferencias significativas entre los arreglos de cultivo (Tabla 2).

En el primer grupo de variables, relacionadas con los servicios hidrológicos del suelo, se tuvo que la porosidad total varió entre 64.4% (MONO) y 69.3% (TA), la conductividad hidráulica se mantuvo entre 26.7 cm/h (AA) y 47.2 cm/h (TA) sin embargo, presentó desviaciones estándar muy altas (44.7 en el caso de TA). La humedad volumétrica medida a 0 cm fluctuó entre 58.6% (TA) y 63.41% (MONO) y, la humedad volumétrica medida a PMP estuvo entre 23.4% (TA) y 27.4% (MONO). En cuanto a los macroporos, fluctuaron desde 31.9% (MONO) hasta 40.1% (TA) y los microporos entre 23.43% (TA) y 27.4% (MONO) (Tabla 2).

El segundo grupo de variables, asociadas con la estabilidad del suelo, reveló que la densidad aparente estuvo entre 0.72 g/cm³ (TA y AC) y 0.84 g/cm³ (MONO) mientras que la densidad real osciló entre 2.32 g/cm³ (TA) y 2.36 g/cm³ (MONO y AA). Los AEA 2-1 mm fluctuaron desde 15.7% (TA) y hasta 21.5% (AC) (Tabla 2).

De acuerdo con lo anterior, se observó que con relación a los servicios hidrológicos, el arreglo TA exhibe mayor oferta potencial para retener, transportar y drenar el agua en el suelo y favorecer la disponibilidad del recurso para el cultivo de plátano, cuya demanda hídrica es significativa. Mientras que el arreglo MONO, en comparación con TA, mostró diferencias significativas

($p < 0.05$) en la oferta de dichos servicios puesto que se caracterizó por presentar valores superiores en humedad volumétrica medida a 0 cm, lo cual sugiere posibles problemas de encharcamiento en la superficie y, mayor humedad volumétrica medida a PMP, asociada con el agua no disponible para las plantas. Consecuentemente, la tendencia en las variables de estabilidad del suelo, corrobora los resultados del primer grupo de variables debido a que el arreglo MONO exhibe mayor densidad aparente y real promedio, lo que se traduce en la disminución del potencial para el transporte y drenaje de agua.

Entre las variables descritas, se descartó la conductividad hidráulica saturada puesto que exhibió desviaciones estándar muy altas entre fincas y por tanto, los valores por arreglo se vieron afectados. En cuanto a la porosidad total, humedad volumétrica medida a 0 cm y PMP y microporos fueron descartados como variables sensibles para el análisis de interacciones al evaluarse con los demás criterios definidos (valores p cercanos a 0.001 y mayor sensibilidad a las prácticas de manejo). Por tal motivo, la densidad aparente, macroporos y AEA 2-1 mm se consideraron más apropiados para el análisis de interacciones debido a que muestran diferencias significativas entre arreglos ($p < 0.05$) con valores más cercanos a 0.0001 (Tabla 2) y representan mayor sensibilidad en cuanto al efecto de las prácticas de manejo como por ejemplo, la intensidad del cultivo, actividades de preparación y manejo del suelo, especialmente con factores asociados al pisoteo y las técnicas de manejo de arvenses que generan impactos sobre los servicios ecosistémicos de regulación relacionados con el transporte y drenaje de agua y la resistencia a la erosión.

En las variables relacionadas con los servicios ecosistémicos de provisión de nutrientes se encontró que seis de las doce presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$): N, MO, K, Ca, Fe y Mn. El porcentaje de N en el suelo y el porcentaje de MO (calculado en función del N) varió de 1.48% y 7.39% (TA) hasta 1.74% y 8.71% (AC) respectivamente. El contenido de K fluctuó desde 0.75 meq/100g suelo hasta 1.23 meq/100g suelo (AA) mientras que el contenido de Ca fluctuó desde 7.27 meq/100g suelo (MONO) hasta 10.29 meq/100g suelo (AC). En cuanto al Fe, su concentración en el suelo osciló desde 132.5 ppm (AC) hasta 155.5 ppm (TA). A su vez, la concentración de Mn, varió entre 24.27 ppm (AC) y 36 ppm (TA) (Tabla 3).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las variables asociadas con la provisión de nutrientes, se deduce mayor disponibilidad de elementos mayores (N, K) en los arreglos caracterizados, de acuerdo con la clasificación del MADR (2005), por un manejo agronómico que va desde significativo en AC hasta permanente en AA y MONO. Esto pudo deberse a las aplicaciones más frecuentes e intensivas de productos fertilizantes, altamente utilizados en sistemas de manejo que tienden a maximizar el rendimiento del cultivo. En cambio, se encontraron mayores concentraciones de elementos menores (Fe, Mn) en el arreglo TA, posiblemente debido probablemente a la procedencia del tipo de suelos alofánicos, al contenido de materia orgánica y a la actividad microbiana, a las bajas aplicaciones de cal en los sistemas tradicionales; los cuales, movilizan el Fe o, también, por la capacidad del Mn de alterar la concentración de Fe en el suelo.

Tabla 2. Variables asociadas con servicios hidrológicos y estabilidad del suelo con diferencias significativas entre arreglos de cultivo: Tradicional Arbóreo (TA) n=60, Asociado con Café (AC) n=48, Asociado con Aguacate (AA) n=48 y Monocultivo (MONO) n=42.

Arreglo	DA (g/cm ³)	DR (g/cm ³)	PT (%)	CHS (cm/h)	HV 0 cm (%)	HV PMP (%)	Macro (%)	Micro (%)	AEA 2 - 1 (%)
TA	0.72 ± 0.21 ^{a*}	2.33 ± 0.03 ^{ab}	69.28 ± 8.36 ^b	47.25 ± 44.72 ^b	58.58 ± 8.94 ^a	23.43 ± 7.68 ^b	40.13 ± 16.44 ^b	23.43 ± 7.68 ^b	15.69 ± 5.99 ^a
AC	0.72 ± 0.16 ^a	2.32 ± 0.08 ^a	69.19 ± 6.40 ^b	38.65 ± 22.98 ^b	61.67 ± 7.41 ^{ab}	24.33 ± 7.98 ^{ab}	39.13 ± 12.88 ^b	24.33 ± 7.98 ^{ab}	21.50 ± 6.02 ^b
AA	0.79 ± 0.17 ^b	2.36 ± 0.06 ^b	66.55 ± 6.55 ^{ab}	26.74 ± 22.46 ^a	63.35 ± 8.82 ^b	27.31 ± 6.63 ^{ab}	34.23 ± 12.39 ^{ab}	27.31 ± 6.63 ^{ab}	19.14 ± 6.11 ^b
MONO	0.84 ± 0.19 ^b	2.36 ± 0.07 ^b	64.44 ± 7.36 ^a	36.71 ± 20.69 ^b	63.41 ± 6.90 ^b	27.40 ± 7.57 ^a	31.86 ± 13.35 ^a	27.40 ± 7.57 ^a	18.47 ± 8.30 ^b

DA: densidad aparente $p= 0.0026$; DR: Densidad real $p= 0.0245$; PT: Porosidad total $p= 0.0038$; CHS: Conductividad hidráulica saturada $p= 0.0408$; HV 0 cm: Humedad volumétrica a 0 cm $p= 0.0128$; HV PMP: Humedad volumétrica a Punto de Marchitez Permanente $p= 0.0120$; Macro: Macroporos $p= 0.0213$; Micro: Microporos $p= 0.0320$; AEA 2-1: Agregados a Estables al Agua 2-1 mm $p= 0.0001$.

*Letras semejantes indican que no hay diferencias significativas ($p < 0.05$) entre arreglos de cultivo.

Tabla 3. Variables asociadas con la provisión de nutrientes con diferencias significativas entre arreglos de cultivo: Tradicional Arbóreo (TA) n=60, Asociado con Café (AC) n=48, Asociado con Aguacate (AA) n=48 y Monocultivo (MONO) n=42.

Arreglo	N (%)	M.O (%)	K (meq/100g Suelo)	Ca (meq/100g Suelo)	Fe (ppm)	Mn (ppm)
TA	1.48 ± 0.31 ^a	7.39 ± 1.53 ^a	1.00 ± 0.66 ^c	8.89 ± 4.48 ^{ab}	155.58 ± 75.57 ^b	36.02 ± 21.70 ^b
AC	1.74 ± 0.45 ^b	8.71 ± 2.23 ^b	0.75 ± 0.66 ^a	10.29 ± 5.40 ^b	132.56 ± 71.51 ^a	24.27 ± 13.21 ^a
AA	1.57 ± 0.32 ^a	7.87 ± 1.62 ^a	1.23 ± 1.54 ^{bc}	7.64 ± 4.14 ^a	145.04 ± 54.26 ^b	29.31 ± 16.05 ^a
MONO	1.52 ± 0.36 ^a	7.62 ± 1.79 ^a	0.77 ± 0.62 ^{ab}	7.27 ± 3.07 ^a	142.62 ± 62.28 ^{ab}	28.98 ± 14.06 ^{ab}

N: Nitrógeno $p= 0.0029$; M.O: Materia Orgánica $p= 0.0029$; K: Potasio $p= 0.0065$; Ca: Calcio $p= 0.0431$; Fe: Hierro $p= 0.0315$; Mn: Manganeso $p= 0.0013$.

*Letras semejantes indican que no hay diferencias significativas ($p < 0.05$) entre arreglos de cultivo.

De acuerdo con los criterios definidos, las variables de Ca, MO y Fe fueron descartadas porque aunque son importantes en el cultivo de musáceas, se destaca la prevalencia del N y K como elementos altamente demandados y cuya aplicación supone una prioridad por parte de los agricultores de la zona; en el caso del Mn se tuvo en cuenta su influencia en el balance de nutrientes, captura de Ca, Mg y Zn y maduración del fruto. En consecuencia, N, K y Mn se consideraron como variables claves para el análisis de interacciones entre SE ya que además de cumplir con los criterios estadísticos propuestos, se reconoce su importancia para el establecimiento y mantenimiento óptimo del cultivo de plátano y, a condición de su sensibilidad en función del tipo de prácticas y actividades desarrolladas en los arreglos de cultivo, por ejemplo, el uso de fertilizantes de síntesis química o de enmiendas orgánicas, factores que potencialmente pueden producir diferencia entre los arreglos evaluados.

Por último, respecto con las variables asociadas con la producción de biomasa, se encontró que el número de manos promedio se mantuvo entre 5.32 unidades (TA) y 5.71 unidades (MONO); el número promedio de dedos por racimo osciló entre 37.83 unidades (AC) y 43.53 unidades (AA) con longitudes promedio de los dedos centrales de la primera y tercera mano del racimo de 29.53 cm (MONO) a 31.10 cm (AA) y un perímetro estimado de 16.12 cm (MONO) a 16.80 cm (AA). Sin embargo, en correspondencia con el criterio estadístico de significancia ($p < 0.05$), solo se encontraron diferencias en cuanto al peso neto del racimo, por lo que fue seleccionada como variable clave para el análisis de interacciones. El arreglo TA exhibió los racimos más pesados entre los cuatro arreglos (15.85 kg) en contraste con el de menor peso producido en el arreglo AC (12.36 kg), Las diferencias se mostraron entre TA respecto con MONO (13.59 kg) y AC y, entre AA (14.18 kg) y AC (Tabla 3) (Tabla 4).

Tabla 4. Variables asociadas con la producción de biomasa con diferencias significativas entre arreglos de cultivo: Tradicional Arbóreo (TA) n=50, Asociado con Café (AC) n=40, Asociado con Aguacate (AA) n=40 y Monocultivo (MONO) n=35**.

Arreglo	Peso de racimo(kg)**
TA	15.85 ± 3.75 ^c
AC	12.36 ± 3.29 ^a
AA	14.18 ± 4.00 ^{bc}
MONO	13.59 ± 3.65 ^{ab}

Peso del racimo $p = 0.0002$.

*Letras semejantes indican que no hay diferencias significativas ($p < 0.05$) entre arreglos de cultivo.

**Se tomaron cinco muestras por finca.

Las variables asociadas con servicios hidrológicos, estabilidad del suelo y la provisión de nutrientes (densidad aparente, macroporos, agregados estables al agua 2-1 mm, N, K y Mn) fueron

clasificadas en la categoría de servicios de regulación, mientras que aquellas relacionadas con la biodiversidad (abundancia y biomasa de miriápodos) y la producción de biomasa (Peso del racimo) fueron consideradas como importantes para la generación de servicios de aprovisionamiento; ellos fueron definidos como servicios ecosistémicos clave para el análisis de interacciones (Tabla 5).

Tabla 5. Variables y servicios ecosistémicos seleccionados para el análisis de interacciones

Categoría	Servicio ecosistémico	ID	Variable	Unidad	Valor p
Regulación	Estabilidad y soporte físico	ESF	Densidad aparente	g/cc	0.0026
	Transporte y drenaje	TD	Macroporos	%	0.0213
	Resistencia a la erosión	RE	AEA 2 – 1 mm	%	0.0001
	Almacenamiento de Nitrógeno	AN	N	%	0.0029
	Fertilidad	F	K	meq/100 g Suelo	0.0065
	Balance de nutrientes	BN	Mn	Ppm	0.0013
Aprovisionamiento	Presencia de macroinvertebrados	PM	Abundancia de miriápodos	Ind.m ⁻²	0.0002
	Actividad de macroinvertebrados	AM	Biomasa de miriápodos	g.p.f.m ⁻²	0.0001
	Producción de biomasa racimo	PBR	Peso del racimo	Kg	0.0002

3.2. Prácticas de manejo en los arreglos de cultivo

Las prácticas desarrolladas en las fincas evaluadas difirieron según el arreglo por el tipo de métodos y productos empleados para el establecimiento y manejo del cultivo (Tabla 6). Relacionado con la desinfección de colinos y hoyos, ésta se realiza en todos los arreglos a excepción del TA. Los productos utilizados para desinfectar colinos en el arreglo AA son Cal y Furadan, en AA se emplea formol, Lorsban y Furadan, mientras que en MONO se usa Furadan, Cal, Lorsban, Específico e hipoclorito. Para la desinfección de hoyo se usa Cal y Furadan en AA, en el AC se aplica Lorsban, formol y Furadan, en MONO se utiliza además de los productos anteriores, el hipoclorito.

De otro lado, la densidad de siembra en el arreglo TA, presentó el menor número de plantas por hectárea (800 plantas) debido a que en él, se observa la presencia de vegetación acompañante arbórea y otros cultivos de “pan coger” tales como yuca, frijol, plantas medicinales, ya sea para el consumo propio o la comercialización local. En el arreglo AA la densidad de siembra fluctuó entre 1600 y 1666 plantas por hectárea, en MONO 1666 plantas y en AC se siembran con mayor frecuencia 1111 plantas por hectárea.

En los cuatros arreglos se lleva a cabo el embolsado del racimo para protegerlo de insectos, aves y otros elementos que puedan afectar la calidad del fruto; sin embargo, en el arreglo TA, contrario con los demás, la bolsa no se trata con Clorpirifos y/o Bifentrina.

En el caso del TA, la labor se realiza manualmente con guadaña y con herbicida (Glifocafe), en AA es manual y con herbicidas como Glifocafe y Roundup; en AC por medio de machete, guadaña y herbicidas y; en MONO se utilizan productos herbicidas (Glifocafe y Roundup) y guadaña.

El control de plagas y enfermedades solo se realiza manual y con químico en TA, en comparación con los demás arreglos en los que se hace solo químicamente. Los productos utilizados como plaguicidas son comunes en los cuatro arreglos, ya que emplean el Lorsban y el Furadan, para el control de picudo negro (*Cosmopolites sordilus*) picudo rayado (*Metamasius hemipterus*) ceramida (*Ceramida musicola*) y el nematodo barrenador *Radopholus similis* no obstante, en MONO se encontraron algunos predios que usan Engeo.

Los fertilizantes son utilizados en los cuatro arreglos, sin embargo, los productos y dosis empleados varían: En el TA, se utilizan en promedio dos, el Triple 15 y Úrea con una dos anual promedio de 37.5 g/planta; en el AA se emplea además de Triple 15 y Úrea, el Platanero 10-4-14 de origen mineral orgánico con dosis anual promedio de 70 g/planta; en el AC los productos que usan son Platanero, Úrea, Fosfato Diamónico DAP y Triple 15 con dosis de 80 g/planta; en el caso del MONO, se usan además de los productos ya mencionados, el KCL, con dosis promedio anual de 80 g/planta.

Las enmiendas orgánicas complementan la práctica de fertilización con el propósito de cubrir las necesidades nutricionales del plátano, principalmente de N, K y P, elementos altamente demandados por la musácea. En los arreglos AA y AC se utilizan productos como el compost, gallinaza y pulpa de café. Sin embargo, en el arreglo TA, se utiliza mayor variedad de productos puesto que además de los mencionados se incorpora, MO, “Bokashi” y lixiviado de plátano mientras que en el MONO solo se emplea pulpa y/o gallinaza.

Tabla 6. Descripción de las prácticas de manejo desarrolladas en los arreglos de cultivo de plátano. Elaboración propia

PRÁCTICA	ARREGLO				
	TA	AA	AC	MONO	
Desinfección de colino	No	Sí	Sí	Sí	
Insumo utilizado	No aplica	Cal, Furadán	Lorsban, Furadán	formol,	Furadán, cal, Lorsban, Glifocafe e Hipoclorito

PRÁCTICA	ARREGLO			
	TA	AA	AC	MONO
Desinfección de hoyo	No	Sí	Sí	Sí
Insumo utilizado	No aplica	Cal	Cal, Furadán	Furadán, cal e Hipoclorito
Distancia de siembra	800 plantas por hectárea	1600 plantas por hectárea	1355 plantas por hectárea	1600 plantas por hectárea
Embolsa	Sí	Sí	Sí	Sí
Emplea bolsa tratada	No	Sí	Sí	Sí
Control de arvenses	Manual, guadaña y herbicida	Manual y herbicida	Machete, guadaña y herbicida	Guadaña y herbicida
Control de plagas y enfermedades	Químico y manual	Químico	Químico	Químico
Emplea plaguicidas	Sí	Sí	Sí	Sí
Productos plaguicidas	Furadán y Lorsban	Furadan y Lorsban,	Lorsban	Furadán, Lorsban y Engeos
Utiliza fertilizante	Sí	Sí	Sí	Sí
Insumo fertilizante	Triple 15 y Urea	Triple 15, Urea y Platanero	Platanero, Urea, Fosfato Diamónico y/o Triple 15	Platanero, Urea, Triple 15, Fosfato Diamónico y Cloruro de Potasio
Dosis de fertilizante por año	37.5 g/planta	70 g/planta	80 g/planta	60 g/planta
Número promedio de productos fertilizantes	2	3	4	3

PRÁCTICA	ARREGLO					
	TA	AA	AC		MONO	
Enmiendas orgánicas	Compost, gallinaza, pulpa, Bokashi, MO	Pulpa, compost	gallinaza,	Pulpa, gallinaza	compost,	Pulpa, gallinaza

3.3. Compensaciones, sinergias e interacciones neutrales entre SE

Las interacciones entre los SE fueron identificadas como sinergia, compensación y neutral, a nivel general, en los 144 casos evaluados (36 por arreglo) los valores del coeficiente r_s oscilaron entre -0.94 y 0.99. Se observó una tendencia hacia las relaciones de tipo neutral en 108 de los casos, 18 fueron caracterizados como compensación y 21 como sinergias.

En el arreglo Tradicional Arbóreo (TA) se encontraron en dos casos compensaciones altamente significativas ($p < 0.05$) entre los servicios: Estabilidad y soporte físico (ESF) y Transporte y drenaje (TD) ($r_s = -0.94$) y entre los servicios de Balance de nutrientes (BN) y Producción de biomasa racimo (PBR) ($r_s = -0.33$). Solo se identificó una sinergia altamente significativa entre Presencia de macroinvertebrados (PM) y Actividad de macroinvertebrados del Suelo (AM) ($r_s = 0.84$). Los demás casos (33) correspondieron con interacciones de tipo neutral (Tabla 7).

Tabla 7. Coeficientes de correlación de Spearman y probabilidades en el arreglo Tradicional Arbóreo (TA)

Coef. ρ \ Prob	ESF	TD	RE	AN	F	BN	PM	AM	PBT
ESF	1,00	0,00	0,96	0,80	0,15	0,24	0,80	0,76	0,73
TD	-0,94	1,00	0,72	0,59	0,22	0,23	0,61	0,74	0,52
RE	0,01	0,05	1,00	0,11	0,67	0,13	0,95	0,54	0,45
AN	-0,03	-0,07	-0,21	1,00	0,10	0,98	0,47	0,84	0,35
F	-0,19	0,16	0,06	0,21	1,00	0,24	0,42	0,94	0,36
BN	-0,15	0,16	0,20	0,00	0,15	1,00	0,44	0,16	0,02
PM	0,03	-0,07	0,01	0,10	0,11	-0,10	1,00	0,00	0,37
AM	-0,04	0,04	0,08	-0,03	-0,01	-0,18	0,84	1,00	0,94
PBT	0,05	-0,09	-0,11	-0,13	-0,13	-0,33	-0,13	0,01	1,00
ρ_i	-1,26	-0,76	0,09	-0,16	0,36	-0,25	0,79	0,71	-0,86
Rank	9	7	4	5	3	6	1	2	8

Estabilidad y soporte físico (ESF), Transporte y drenaje (TD), Resistencia a la erosión (RE), Almacenamiento de Nitrógeno (AN), Fertilidad (F), Balance de Nutrientes (BN), Presencia de macroinvertebrados (PM), Actividad de macroinvertebrados (AM), Producción de Biomasa Racimo (PBR).

Compensaciones= Resaltadas en rojo; Sinergias= Resaltadas en azul

Valores resaltados y en negrita corresponden con interacciones altamente significativas ($p < 0.05$), únicamente resaltados corresponden con interacciones significativas ($p < 0.1$).

En el arreglo Asociado con Aguacate y otros frutales (AA) de los 36 casos, cuatro se caracterizaron como compensaciones altamente significativas ($p < 0.05$) entre el servicio de Estabilidad y soporte físico (ESF) y: *i*) Transporte y drenaje (TD) ($r_s = -0.91$), *ii*) Resistencia a la erosión (RE) ($r_s = -0.28$), *iii*) Almacenamiento de nitrógeno (AN) ($r_s = -0.38$) y *iv*) Fertilidad (F) ($r_s = -0.29$). Relacionado con las sinergias, se hallaron ocho altamente significativas ($p < 0.05$) entre: Transporte y Drenaje (TD) y Fertilidad (F) ($r_s = 0.30$); Fertilidad (F) y: *i*) Balance de nutrientes (BN) ($r_s = 0.55$), *ii*) Presencia de macroinvertebrados (PM) ($r_s = 0.37$) y *iii*) Actividad de macroinvertebrados (AM) ($r_s = 0.34$); Balance de nutrientes (BN) y: *i*) Presencia de macroinvertebrados (PM) ($r_s = 0.33$), *ii*) Actividad de macroinvertebrados (AM) ($r_s = 0.33$), *iii*) Producción de biomasa racimo (PBR) ($r_s = 0.40$); y Presencia de macroinvertebrados (PM) y Actividad de macroinvertebrados (AM) ($r_s = 0.93$). Adicionalmente, se identificaron dos sinergias significativas ($p < 0.1$) entre los servicios de Resistencia a la erosión (RE) y Almacenamiento de nitrógeno (AN) ($r_s = 0.28$) y entre Transporte y drenaje (TD) y Presencia de macroinvertebrados (PM) ($r_s = 0.26$). Los casos restantes (22) se caracterizaron como interacciones neutrales (Tabla 8).

Tabla 8. Coeficientes de correlación de Spearman y probabilidades en el arreglo Asociado con Aguacate y otros frutales (AA)

Coef. r_s \ Prob	ESF	TD	RE	AN	F	BN	PM	AM	PBT
ESF	1,00	0,00	0,05	0,01	0,04	0,43	0,29	0,50	0,48
TD	-0,91	1,00	0,26	0,22	0,04	0,49	0,08	0,22	0,73
RE	-0,28	0,16	1,00	0,06	0,10	0,65	0,25	0,32	0,59
AN	-0,38	0,18	0,28	1,00	0,49	0,48	0,29	0,36	0,14
F	-0,29	0,30	-0,24	0,10	1,00	0,00	0,01	0,02	0,34
BN	-0,12	0,10	-0,07	0,10	0,55	1,00	0,02	0,02	0,01
PM	-0,16	0,26	-0,17	0,16	0,37	0,33	1,00	0,00	0,98
AM	-0,10	0,18	-0,15	0,14	0,34	0,33	0,93	1,00	0,78
PBT	-0,11	0,06	0,09	0,24	0,16	0,40	0,00	0,05	1,00
r_s acum	-2,35	0,33	-0,38	0,82	1,29	1,62	1,72	1,72	0,89
Rank	9	7	8	6	4	3	1	2	5

Estabilidad y soporte físico (ESF), Transporte y drenaje (TD), Resistencia a la erosión (RE), Almacenamiento de Nitrógeno (AN), Fertilidad (F), Balance de Nutrientes (BN), Presencia de macroinvertebrados (PM), Actividad de macroinvertebrados (AM), Producción de Biomasa Racimo (PBR).

Compensaciones= Resaltadas en rojo; Sinergias= Resaltadas en azul

Valores resaltados y en negrita corresponden con interacciones altamente significativas ($p < 0.05$), únicamente resaltados corresponden con interacciones significativas ($p < 0.1$).

En el Asociado con Café (AC) se identificaron cuatro compensaciones altamente significativas ($p < 0.05$) entre los servicios: Estabilidad y soporte físico (ESF) y *i*) Transporte y Drenaje ($r_s = -0.82$), *ii*) Presencia de macroinvertebrados (PM) ($r_s = -0.38$), *iii*) Actividad de macroinvertebrados

(AM) ($r_s = -0.37$); Transporte y Drenaje (TD) y Balance de nutrientes (BN) ($r_s = -0.32$). En cuatro casos fueron halladas sinergias, dos altamente significativas ($p < 0.05$) entre los servicios de Fertilidad (F) y Balance de nutrientes (BN) ($r_s = 0.75$), y Presencia de macroinvertebrados (PM) y Actividad de macroinvertebrados (AM) ($r = 0.99$); y dos significativas ($p < 0.1$) entre el servicio Actividad de macroinvertebrados (AM) y Fertilidad (F) ($r_s = 0.26$) y Balance de nutrientes (BN) ($r_s = 0.27$). Las interacciones de tipo neutral se presentaron en 28 casos (Tabla 9).

Tabla 9. Coeficientes de correlación de Spearman y probabilidades en el arreglo Asociado con Café (AC)

Coef. r_s \ Prob	ESF	TD	RE	AN	F	BN	PM	AM	PBT
ESF	1,00	0,00	0,41	0,36	0,76	0,35	0,01	0,01	0,98
TD	-0,82	1,00	0,37	0,32	0,23	0,03	0,18	0,27	0,31
RE	0,12	-0,13	1,00	0,43	0,37	0,43	0,16	0,16	0,45
AN	-0,14	-0,15	-0,12	1,00	0,59	0,27	0,20	0,17	0,77
F	-0,05	-0,18	0,13	0,08	1,00	0,00	0,09	0,07	0,82
BN	0,14	-0,32	0,12	0,16	0,75	1,00	0,11	0,07	0,74
PM	-0,38	0,20	-0,20	0,19	0,25	0,23	1,00	0,00	0,99
AM	-0,37	0,16	-0,21	0,20	0,26	0,27	0,99	1,00	1,00
PBT	0,00	-0,16	0,12	-0,05	-0,04	-0,05	0,00	0,00	1,00
r_s acum	-1,50	-1,40	-0,17	0,17	1,20	1,30	1,28	1,30	-0,18
Rank	9	8	6	5	4	1	3	2	7

Estabilidad y soporte físico (ESF), Transporte y drenaje (TD), Resistencia a la erosión (RE), Almacenamiento de Nitrógeno (AN), Fertilidad (F), Balance de Nutrientes (BN), Presencia de macroinvertebrados (PM), Actividad de macroinvertebrados (AM), Producción de Biomasa Racimo (PBR).

Compensaciones= Resaltadas en rojo; Sinergias= Resaltadas en azul

Valores resaltados y en negrita corresponden con interacciones altamente significativas ($p < 0.05$), únicamente resaltados corresponden con interacciones significativas ($p < 0.1$).

En el Monocultivo (MONO) se observó el mayor número de compensaciones, presentándose en siete casos, cinco altamente significativas ($p < 0.05$) y dos significativas ($P < 0.1$). En relación con las primeras, se ubicaron las interacciones entre: Estabilidad y soporte físico (ESF) y *i*) Transporte y Drenaje (TD) ($r_s = -0.89$) *ii*) Almacenamiento de nitrógeno (AN) ($r_s = -0.32$) *iii*) Actividad de macroinvertebrados ($r_s = -0.34$); Resistencia a la erosión (RE) y Actividad de macroinvertebrados (AM) ($r_s = -0.30$); Almacenamiento de nitrógeno (AN) y Producción de biomasa racimo (PBR) ($r_s = -0.43$). Respecto con las segundas, éstas se encontraron entre Presencia de macroinvertebrados (PM) y *i*) Estabilidad y soporte físico (ESF) ($r_s = -0.29$) y *ii*) Resistencia a la erosión (RE) ($r_s = -0.29$). Cinco casos fueron caracterizados como sinergias, dos altamente significativas ($p < 0.05$) entre Fertilidad (F) y Balance de nutrientes (BN) ($r_s = 0.55$) y entre Presencia de macroinvertebrados (PM) y Actividad de macroinvertebrados (AM) ($r_s = 0.94$); y las otras tres fueron significativas ($p < 0.05$) entre Transporte y drenaje (TD) y Actividad de macroinvertebrados (AM) ($r_s = 0.28$), Fertilidad (F) y Presencia de macroinvertebrados (PM) ($r_s = 0.29$) y, Balance de

nutrientes (BN) y Presencia de macroinvertebrados (PM) ($r_s = 0.27$). Las relaciones neutrales ocurrieron en 24 casos (Tabla 10).

El coeficiente de r_s acumulado osciló entre -2.35 para Estabilidad y soporte físico y 1.72 en el servicio de Presencia de macroinvertebrados. Entre los nueve servicios ecosistémicos evaluados, el servicio de regulación asociado con la Estabilidad y soporte físico (ESF) fue el que más presentó compensaciones en los cuatro arreglos, posicionándose en el último lugar con valores de -2.35 (AA), -1.59 (MONO), -1.50 (AC) y -1.26 (TA). En primer lugar, se ubicó el servicio de aprovisionamiento relacionado con la Presencia de macroinvertebrados en tres de los cuatro arreglos con valores de 1.72 (AA), 0.98 (MONO) y 0.79 (TA), mientras que en el caso del arreglo AC, el servicio más sinérgico fue el de Balance de nutrientes (BN) con un coeficiente de 1.30 (Tablas 7-10).

Los servicios con valores de r_s acumulado más negativos estuvieron relacionados, en los cuatro arreglos, con servicios de regulación asociados con el agua y el suelo como la estabilidad y soporte físico, el transporte y drenaje y la resistencia a la erosión, al igual que con el servicio de almacenamiento de nitrógeno asociado con la química del suelo. Mientras que, en el caso de los servicios con más sinérgias, estuvieron relacionados con servicios de aprovisionamiento asociados con la presencia y actividad de macroinvertebrados en los arreglos TA, AA y MONO y con el servicio de regulación de balance de nutrientes en el caso del arreglo AC.

Tabla 10. Coeficientes de correlación de Spearman y probabilidades en el arreglo Monocultivo (MONO)

Coef. r_s \ Prob	ESF	TD	RE	AN	F	BN	PM	AM	PBT
ESF	1,00	0,00	0,24	0,04	0,39	0,71	0,06	0,03	0,13
TD	-0,89	1,00	0,90	0,23	0,98	0,51	0,19	0,07	0,65
RE	0,19	0,02	1,00	0,41	0,23	0,57	0,06	0,05	0,19
AN	-0,32	0,19	0,13	1,00	0,16	0,85	0,58	0,98	0,01
F	-0,14	0,00	-0,19	-0,22	1,00	0,00	0,07	0,13	0,17
BN	-0,06	-0,10	-0,09	-0,03	0,55	1,00	0,08	0,14	0,87
PM	-0,29	0,21	-0,29	0,09	0,29	0,27	1,00	0,00	0,16
AM	-0,34	0,28	-0,30	0,00	0,24	0,23	0,94	1,00	0,28
PBT	0,26	-0,08	0,23	-0,43	0,23	0,03	-0,24	-0,19	1,00
r_s acum	-1,59	-0,37	-0,30	-0,59	0,76	0,80	0,98	0,86	-0,19
Rank	9	7	6	8	4	3	1	2	5

Estabilidad y soporte físico (ESF), Transporte y drenaje (TD), Resistencia a la erosión (RE), Almacenamiento de Nitrógeno (AN), Fertilidad (F), Balance de Nutrientes (BN), Presencia de macroinvertebrados (PM), Actividad de macroinvertebrados (AM), Producción de Biomasa Racimo (PBR).

Compensaciones= Resaltadas en rojo; Sinérgias= Resaltadas en azul

Valores resaltados y en negrita corresponden con interacciones altamente significativas ($p < 0.05$), únicamente resaltados corresponden con interacciones significativas ($p < 0.1$).

4. DISCUSIÓN

4.1. Variables claves para la cuantificación de servicios ecosistémicos de aprovisionamiento y regulación

La evaluación de un cúmulo de variables en algunos lugares del municipio de Armenia, para cuatro arreglos de cultivar plátano asociadas con la generación de servicios ecosistémicos de aprovisionamiento y regulación, en los que confluyen múltiples propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, supone un reto para adelantar estudios relacionados con las interacciones entre los SE. Sin embargo, la metodología propuesta partió de la incorporación de criterios estadísticos y la pertinencia de cada variable en la generación de dichos servicios y permitió identificar aquellas que representan aspectos claves para evaluar las interacciones entre los SE en cada uno de los arreglos de cultivo y relacionarlas con las prácticas de manejo que afectan directa e indirectamente la capacidad del sistema para producirlos.

En relación con las variables asociadas con la estabilidad del suelo, se consideró como clave el porcentaje de agregados estables al agua, puesto que además de estar relacionado con la estructura del suelo, distintas propiedades químicas y biológicas también se ve afectado por las prácticas de manejo (Allen *et al.*, 2011). Su valor en el mantenimiento de importantes funciones ecosistémicas en el suelo como la acumulación de carbono orgánico, capacidad de infiltración, transporte y drenaje de agua, y la actividad microbiológica y de las raíces, lo constituye como factor sustancial en la determinación de impactos generados por el manejo del suelo.

En este estudio, solo se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de agregados estables al agua de tamaño entre 2 y 1 mm, sin embargo, Allen *et al.* (2011) concuerdan en que la estabilidad de agregados de este tamaño se debe principalmente a la actividad de las raíces e hifas en suelos donde hay alto contenido de CO. Adicionalmente, los planteamientos de Tisdall y Oades (1982) sobre la participación de las raíces e hifas arbusculo-vesiculares en la estabilización de dichos agregados, sugieren que el tamaño que interesa conocer para estudiar el efecto del manejo del suelo es el de aquellos mayores que 0.2-0.25 mm. Por tal razón, se consideró que los agregados estables de tamaño entre 2 -1 mm, permiten valorar el servicio de Resistencia a la erosión (RE), al asociarse con la capacidad del suelo para resistir procesos de desagregación, traslado y pérdida de materiales producida por algún tipo de presión sobre el suelo, por ejemplo, relacionada con la erradicación de la vegetación protectora y su capacidad de amarre en el suelo.

Entre las variables asociadas con el servicio de estabilidad, la densidad aparente, es a menudo utilizada como indicadora indirecta de la aireación, fuerza y capacidad de almacenar y transportar agua (Reynolds *et al.*, 2008) y diversos estudios han demostrado que existe un impacto de la densidad aparente sobre la pérdida de la capacidad de cultivo por el inadecuado anclaje y desarrollo de las raíces, la reducción del agua disponible para las plantas y la pérdida de nutrientes por escorrentía. En este caso, fue utilizada para medir el servicio de Estabilidad y soporte físico (ESF),

entendido como la capacidad del suelo para favorecer el enraizamiento de la planta y asegurar el desarrollo óptimo del sistema radicular, puesto que las restricciones físicas como en el caso de la compactación puede producir la pérdida de espacios porosos que pueden ser ocupados por las raíces, la circulación del agua y el aire, la actividad biológica y la provisión de nutrientes. Por otro lado, suelos con densidad aparente muy baja pueden verse afectados por problemas de inestabilidad relacionados con el efecto del agua y la poca agregación del suelo, y que, en el caso de plátano, son plantas de gran peso que pueden ceder fácilmente por efecto de la gravedad.

En lo que concierne con los servicios hidrológicos del suelo, se tuvo en cuenta que la porosidad total, provee directamente información cuantitativa de la capacidad de un suelo para el transporte y drenaje, aspectos fundamentales en el desarrollo de las plantas. Las características de los poros están estrechamente relacionadas con la calidad física del suelo (Reynolds *et al.*, 2009) y en tal virtud, es importante para analizar su relación con la densidad aparente, la capacidad de agua disponible para las plantas, capacidad de aireación del suelo, entre otros parámetros físicos. Sin embargo, dos suelos pueden presentar valores de porosidad total similares, pero la distribución y tamaño de los poros puede variar significativamente, por tal razón, se consideró que el contenido de macroporos resulta más conveniente, puesto que además de cumplir con los criterios estadísticos definidos en el presente estudio, permite obtener información relacionada con el servicio de transporte y drenaje, considerado de alta importancia al favorecer el óptimo desarrollo del sistema radicular del plátano y permitir la absorción apropiada del agua (Robinson y Galán, 2010).

El servicio de Transporte y drenaje (TD) corresponde con la capacidad del suelo para el movimiento y circulación del agua durante eventos de lluvia o bajo flujos de escorrentía. En ese sentido, los macroporos, como lo mencionan Brunel y Seguel (2011) presentan un importante potencial para incrementar el flujo del agua dentro del suelo y permiten disminuir la pérdida por escorrentía, lo que representa un elemento importante para evitar la ocurrencia de procesos erosivos. Además, mientras estos poros drenan el agua, permiten la entrada de aire a los mismos, lo cual es importante para el intercambio gaseoso en el suelo. Por otra parte, como lo mencionan Reynolds *et al.* (2009) las variables como densidad aparente y macroporos, son funciones del volumen de poros, y los contenidos de carbono orgánico afectan ambas características, entender los vínculos entre la calidad física del suelo, impacto ambiental, capacidad de cultivo y las dinámicas de agua y soluto en el suelo, se deriva de la habilidad de identificar valores óptimos de volumen y función de los poros.

En resumen, las variables que miden servicios de regulación asociados en este caso con las propiedades físicas del suelo, como la densidad aparente, los macroporos y los agregados estables, además de ser considerados como de las más sensibles al manejo y más deseables para determinar la calidad del suelo (Arshad y Martin, 2002) son substanciales en la distribución radical de las plantas tanto lateralmente como en profundidad. Si bien son aspectos determinados por el tipo de

suelo, la compactación y el drenaje (Robinson y Galán, 2011), estos dos últimos elementos pueden ser alterados según el tipo de prácticas que se realicen durante la preparación del terreno, las labores de manejo y recolección del producto. Por ejemplo, la utilización de maquinaria pesada, el uso de herramientas para remover suelo o erradicar arvenses e incluso el pisoteo producido por los trabajadores tienen un efecto directo sobre la estructura del suelo debido a la destrucción de los agregados y la formación de otros con características diferentes, además de que al generarse mayor presión sobre el suelo se produce un incremento de la densidad aparente (problemas de adensamiento) y cuyos efectos son directos sobre la distribución de los poros y la capacidad de retención de agua (Pérez, 1992).

Por lo que se refiere a los servicios asociados con la provisión de nutrientes, si bien cada una de las variables que se consideraron (N, MO, K, Ca, Fe y Mn) son importantes para el establecimiento y desarrollo óptimo del cultivo de plátano, se tuvo en cuenta que las variables de N, K y Mn, además de cumplir con los criterios estadísticos, representan mayor relevancia para el análisis de interacciones entre SE en la medida en que éstas son, relativamente, más ajustadas al análisis del efecto de las prácticas de manejo del cultivo y su impacto sobre las condiciones químicas del suelo.

El contenido de N se utilizó para medir el servicio de regulación asociado con el Almacenamiento de nitrógeno (AN). La misma, se seleccionó como clave, puesto que es un elemento sustancial en la nutrición del plátano y porque, además, debe ser constantemente aplicado incluso en suelos fértiles ya que la planta no puede almacenarlo y si la cantidad de N es insuficiente se pueden producir efectos adversos sobre el desarrollo de la planta y por ende, bajos rendimientos en el cultivo (Robinson y Galán, 2011). Además, es considerado como elemento importante de la salud del suelo al informar sobre la disponibilidad de nutrientes para las plantas e indicar potenciales pérdidas en los rendimientos del cultivo o alertar sobre el efecto de productos de síntesis química sobre la calidad del ambiente (Allen *et al.*, 2011) debido a que debe ser frecuentemente aplicado en dosis controladas, pero que en el contexto local, la utilización excesiva de fertilizantes resulta en la disminución de la productividad debido la degradación física, química y biológica progresiva de los suelos (Robinson y Galán, 2011).

Otro macroelemento de importancia en el cultivo de plátano fue el potasio (K), su extracción es muy elevada pues puede alcanzar remociones de hasta 800 kg de K en campos con rendimientos de 50 ton/ha/año (Robinson y Galán, 2011), razón por la cual se seleccionó para medir el servicio de aprovisionamiento de Fertilidad del suelo (F). De acuerdo con los autores mencionados, las deficiencias de este elemento pueden producir reducciones en el tamaño de las hojas, retrasos en la producción del racimo, número reducido de dedos por racimo y disminuciones en el tamaño del fruto debido a un llenado pobre, lo que en últimas se traduce en menores rendimientos por hectárea y en la afectación económica del productor.

Respecto con el Manganeseo (Mn) se consideró su importancia en el servicio de regulación de Balance de nutrientes (BN), puesto que se constituye como catión importante debido su potencial tóxico en altas concentraciones al reducir la captura de Ca en alrededor del 30%, y este elemento tiene un alto valor en la fuerza de la pared celular por lo que las plantas con deficiencias en Ca presentan menor calidad en el fruto y la cáscara es mucho más frágil, puede romperse con facilidad y producir altas pérdidas en el cultivo. Las concentraciones tóxicas de Mn también pueden afectar la absorción de Mg en 40%, el cual es importante en el proceso de fotosíntesis ya que cuando los valores son bajos, las hojas se tornan con una franja marginal amarilla y amplia que reduce el rendimiento del cultivo; y a su vez, puede someter la absorción de Zn en 20%, el cual es el microelemento de mayor importancia en el cultivo pues interviene significativamente en el desarrollo y salud de las hojas (Robinson y Galán, 2011).

Para evaluar los servicios de aprovisionamiento asociados con la biodiversidad como la Presencia de macroinvertebrados (PM) y Actividad de macroinvertebrados (AM) se utilizó la Abundancia y biomasa de miriápodos, respectivamente, ya que este grupo de macroinvertebrados participa activamente en los procesos de degradación, transporte y mezcla del material orgánico en el suelo, construyen nidos, cavidades para su circulación, sitios de alimentación, contribuyen indirectamente con la formación de comunidades microbiales (Pardo *et al.*, 2006) favorecen la aireación y la infiltración, por tales razones pueden ser considerados como parte del grupo de los denominados “ingenieros del ecosistema” (Lavelle, 1997).

En relación con el primer servicio, este se refiere a la capacidad indicadora de algunos macroinvertebrados del suelo, en este caso, los miriápodos, en los procesos de valoración cualitativa del impacto de las prácticas de manejo pues se espera una mayor abundancia en aquellos sistemas que han sido menos intervenidos en comparación con aquellos en los que se llevan a cabo labores que impactan negativamente sobre la macrofauna edáfica como el uso de fertilizantes y productos de síntesis química (Marín y Feijoo, 2007). El segundo servicio, corresponde también con la capacidad indicadora del grupo sobre la actividad biológica desarrollada a partir de la biomasa.

Sobre el servicio de aprovisionamiento asociado con la Producción de biomasa racimo (PBR) se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre arreglos de cultivo, lo que representa alta importancia en el análisis de interacciones de SE puesto que, en general, se considera que el servicio ecosistémico más importante de un agroecosistema es la producción de alimento, y en tal virtud, los enfoques y esfuerzos por incrementar deliberadamente un único servicio de aprovisionamiento, en este caso la productividad del cultivo de plátano, a menudo resultan en la degradación progresiva y la reducciones en la provisión de otros servicios (Bennett *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2006).

4.2. Tendencias de las prácticas de manejo en cultivares de plátano

Las prácticas de manejo desarrolladas en las fincas difieren de acuerdo con el arreglo. Las diferencias fueron más marcadas en el arreglo TA en comparación con los demás, sin embargo, la tendencia hacia el uso de productos agroquímicos para la fertilización y otros como el Lorsban, Furadan-Carbofuran, Roundup, Glifocafe para realizar las labores de desinfección, control de plagas, enfermedades y arvenses se presenta en los cuatro arreglos puesto que incluso en el arreglo TA, se encontró que a pesar de que uno de los elementos planteados en la clasificación de arreglos del MADR (2005) menciona que no hay fertilización y pocas labores agronómicas, en la práctica los agricultores recurren a productos de síntesis química, bien sea por las necesidades del mercado, recomendaciones por parte de instituciones que brindan asistencia técnica bajo un enfoque productivista o por la idea de considerar que otro tipo de manejo representa mayores costos (Gliessman *et al.*, 2007).




Los sistemas de producción bajo métodos intensivos como el uso frecuente de herramientas, la aplicación de productos agrotóxicos y la pérdida de la cobertura del suelo pueden ocasionar deterioro en la calidad de los suelos agrícolas. Por ejemplo, un suelo pesado, con problemas de compactación y de drenaje, limita drásticamente el desarrollo de las raíces de la planta y recíprocamente, el rendimiento del cultivo (Robinson y Galán, 2011) como consecuencia, la rentabilidad de los productores así como la calidad del agroecosistema se puede ver afectada por problemas relacionados con la erosión y pérdida de suelo fértil, mayor demanda de agroquímicos, los cuales además contaminan el suelo y el agua (Reynolds *et al.*, 2002) y afectan la macrofauna del suelo, entre otros factores. Por ende, en la mayoría de casos las decisiones del agricultor se limitan a métodos intensivos de manejo para intentar resolver los problemas de su cultivo, lo que en últimas podría resultar en la alteración de la oferta, a saber, de servicios asociados con la regulación de los ecosistemas.




El uso de prácticas como el embolsado, de acuerdo con Torres, Bernal y Castaño (2013) no es una actividad indispensable en el manejo agronómico del cultivo, el beneficio que se obtiene en relación con el intervalo de maduración del fruto, comparado con su alto impacto ambiental la convierte en una práctica nociva para la salud de los ecosistemas. Los autores refieren que la mayoría de los agricultores no tienen clara la razón de uso de bolsas tratadas con insecticida, y plantean que su uso obedece más a presiones de mercado por parte de las industrias plástica e instituciones que promueven el uso de este tipo de prácticas bajo un enfoque netamente productivo. En consecuencia, en el sistema platanero del departamento del Quindío ingresan anualmente 840 toneladas de plástico y 7.14 toneladas por año de clorpirifos, los cuales generan un riesgo ambiental tanto en la zona rural como urbana debido a que se evidencian falencias en las prácticas de disposición y tratamiento de las bolsas residuales. Estos elementos tóxicos contenidos en las bolsas tratadas, sumados a la constante aplicación directa de productos para el control de plagas y enfermedades, que en la mayoría de casos se hace de manera indiscriminada, afectan la

sostenibilidad de los ecosistemas, siendo las comunidades de macroinvertebrados los primeros indicadores de las perturbaciones causadas por el manejo intensivo del suelo.

Por otra parte, los intentos por maximizar el rendimiento del cultivo de plátano, mediante la implementación de sistemas de producción en monocultivo, con altas densidades de siembra, representan un riesgo para la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos en los agroecosistemas. No obstante, a pesar de la idea de que al incrementar la densidad de siembra se aumenta el rendimiento bruto del cultivo, es importante aclarar que diversos estudios (Robinson y Galán, 2010) reportan reducciones en el número de dedos por mano y racimo, además de incrementos en los intervalos de maduración y finalmente, un rendimiento menor en la biomasa total obtenida.

Otro aspecto determinante de las altas densidades de siembra sobre los SE, se debe a la necesidad de aportar con mayor frecuencia e intensidad productos fertilizantes y agroquímicos que ejercen un impacto negativo sobre el suelo, el agua y la fauna, por lo que el costo ambiental de la producción se incrementa y al largo plazo, se traduce en la degradación del suelo, en ocasiones irreversible. De manera que resulta necesario analizar la provisión de servicios ecosistémicos más allá de los intentos por maximizar los rendimientos del agroecosistema y comprender que las prácticas de manejo que se desarrollan en cada arreglo, pueden determinar directa o indirectamente los servicios relacionadas con la estabilidad del suelo, el balance de nutrientes, la actividad y presencia de macroinvertebrados (Figura 3), y por efecto de las múltiples interacciones entre estos servicios, se puede ver afectada la capacidad de regeneración del sistema ante las presiones ejercidas por manejos intensivos.

Práctica	Descripción	SE directamente afectados	SE indirectamente afectados	Tendencia esperada	Referencias
Fertilización química	Corresponde con las labores realizadas para satisfacer los requerimientos nutricionales del cultivo plátano mediante la aplicación de productos de diversa composición química como Triple 15, Úrea, DAP, KCL con dosis entre 20 y 200 g/plantas	Fertilidad y Balance de nutrientes	Producción de biomasa racimo, Presencia y Actividad de macroinvertebrados		Robinson y Galán, 2010; Marín y Feijoo, 2007; Thomsen, Faber y Sorensen, 2012; Combatt, Martínez y Barrera, 2004; García <i>et al.</i> , 2009; Sinha <i>et al.</i> , 2014
Control químico de plagas y enfermedades	Pretende prevenir y/o disminuir el ataque de insectos, hongos y bacterias que afectan la salud del cultivo durante sus etapas de desarrollo y cuyos efectos pueden ser devastadores para la producción. El método de control más utilizado en los arreglos evaluados corresponde con el químico, mediante el uso de productos como el Lorbsan, Furadan y Engeo.	Presencia y Actividad de macroinvertebrados	Estabilidad y soporte físico, Transporte y Drenaje, Producción de biomasa racimo		Robinson y Galán, 2010; Marín y Feijoo, 2007; Campitelli <i>et al.</i> , 2010; Thomsen, Faber y Sorensen, 2012
Embolsado del racimo	Se cubre el racimo con bolsa de polietileno tratada con clorpirifos, un insecticida comercializadamente muy utilizado para proteger el fruto del ataque de insectos. Además, el embolsado crea un microclima que incrementa la temperatura hasta en 7° C en un periodo	Producción de biomasa racimo	Fertilidad, Balance de nutrientes, Presencia y Actividad de macroinvertebrados		Thomsen, Faber y Sorensen, 2012; Arango, 2015

Práctica	Descripción	SE directamente afectados	SE indirectamente afectados	Tendencia esperada	Referencias
	de 24 horas y disminuye el intervalo desde la floración hasta la cosecha (hasta 14 días) y aumenta el peso de los racimos (Arango, 2015).				
Desinfección de colinos y hoyo	Se utilizan productos de acción nematocida/insecticida que van desde cal, específico y formol hasta productos agroquímicos como Furadan-Carbofuran y Lorsban-Clorpirifos.	Presencia y Actividad de macroinvertebrados, Balance de nutrientes	Producción de biomasa racimo, Presencia y Actividad de macroinvertebrados		Thomsen, Faber y Sorensen, 2012
Densidad de plantas	Está determinada por la distribución espacial de las plantas por unidad de área en función de las distancias de siembra, las cuales estuvieron entre para una producción entre 800 y 1666 plantas/hectárea,	Estabilidad y soporte físico, Transporte y Drenaje, Fertilidad, Balance de nutrientes, Resistencia a la erosión, Producción de biomasa racimo	Presencia y Actividad de macroinvertebrados		Robinson y Galán, 2010; Volverás y Amézquita, 2009
Control de arvenses	Involucra las labores asociadas con el manejo de la vegetación arvense, comúnmente referida como "maleza" por método manual, con uso de herramientas (guadaña, machete, azadón) y/o químico con productos de alta toxicidad para el ambiente como el Glifocafe y el Roundup.	Presencia y Actividad de macroinvertebrados, Estabilidad y soporte físico, Resistencia a la erosión	Transporte y drenaje, Fertilidad, Balance de nutrientes, Producción de biomasa racimo		Marín y Feijoo, 2007; Cabria, Calandroni y Monterubbiansi, 2002; Volverás y Amézquita, 2009; Sinha et al., 2014


Práctica	Descripción	SE directamente afectados	SE indirectamente afectados	Tendencia esperada	Referencias
Enmiendas orgánicas	Utilización de productos orgánicos derivados del aprovechamiento de residuos de animales y desechos vegetales como el compost, la gallinaza, la pulpa de café y la porquinaza para complementar las labores de fertilización.	Fertilidad y Balance de nutrientes	Estabilidad y soporte físico, Transporte y Drenaje, Resistencia a la erosión, Producción de biomasa racimo, Presencia y Actividad de macroinvertebrados		Robinson y Galán, 2010; Rivera, 1999a; Sinha et al., 2014

Figura 3. Tendencias de las prácticas de manejo sobre los SE.

Flechas en dirección hacia abajo indican la ocurrencia de compensaciones entre los SE involucrados; hacia arriba indican sinergias. Fuente: Autor.

4.3. Interacciones entre servicios ecosistémicos y su relación con las prácticas de manejo

El análisis de interacciones entre servicios ecosistémicos, permite dilucidar en términos de las relaciones entre las variables consideradas claves, los impactos potenciales de las prácticas de manejo sobre la capacidad del sistema para proveer servicios de regulación y aprovisionamiento. De tal manera que algunos servicios ecosistémicos se identificaron como críticos en función del número de compensaciones, es el caso de la estabilidad y soporte físico por presentar valores del coeficiente r_i acumulado más negativos, o por el contrario, la posibilidad de ser reconocidos como estratégicos por presentar valores muy positivos, como en el caso de la presencia de macroinvertebrados; la identificación de este tipo de servicios, se convierte en un punto de partida para evaluar y direccionar las prácticas de manejo en aras de disminuir el impacto de las compensaciones y fortalecer las sinergias.

En el primer caso, la estabilidad y soporte físico, fue crítica debido a que se correlacionó negativamente en los cuatro arreglos con otros servicios de regulación asociados con las propiedades físicas del suelo. Este tipo de interacción, es considerada de gran importancia para el desarrollo óptimo del plátano, debido a la alta sensibilidad de las raíces a la compactación y las potenciales deformaciones causadas en el sistema radicular que pueden afectar el rendimiento de cultivo (Robinson y Galán, 2010). Al respecto, se encontró que dicha interacción, fue más significativa en el arreglo TA, con un coeficiente de -0.94, en el cuales se presentó la densidad aparente más baja (0.72 g/cm^3), y por tanto el contenido de macroporos fue el más alto (40.1%).

Lo anterior puede asociarse con el favorecimiento de la macroporosidad en suelos, y la disminución del riesgo de encharcamiento, y en caso de que se presente, éste será solo temporal, mientras que los cultivares de plátano en suelos con problemas de compactación son propensos a sufrir necrosis y pobre desarrollo de las raíces debido a las condiciones de anegamiento por el limitado transporte del agua y la débil oxigenación en el suelo (Robinson y Galán, 2010). Este factor puede verse agravado, según Klein y Libardi (2002) por la compactación causada con las labores de uso y manejo del suelo desarrollado de manera intensiva, las cuales afectan principalmente a la porosidad debido a que al incrementar la DA se disminuyen los macroporos y aumentan los microporos, lo que produce deficiencias en el proceso de circulación del agua y la disponibilidad del recurso para el crecimiento del sistema radical de las plantas.

Posiblemente, en los cultivares con un arreglo menos intensificado como TA, la baja densidad aparente, además de ser una característica típica de los Andisoles (Robinson y Galán, 2010) esté favorecida por el continuo aporte de materia orgánica derivada del sombrero de especies arbóreas, y el cual mejora las condiciones físicas y disminuye la pérdida de suelo por efecto de la erosión (Salamanca y Sadeghian, 2005) además de beneficiar la presencia de macroinvertebrados que actúan en el suelo y generan cavidades que mejoran el transporte y drenaje del agua.

En contraste con lo anterior, el arreglo MONO exhibió mayor densidad aparente promedio (0.84 g/cm^3) y por lo tanto se produjo una importante reducción en el servicio de TD debido a que la macroporosidad del suelo, se ve fuertemente perturbada por el taponamiento de los grandes poros, lo que produce poros de menor tamaño y se reduce la capacidad de conducción del agua. Aunado con lo anterior, este fenómeno se puede asociar con el uso y manejo más intensivo del suelo marcado por la aplicación de productos de síntesis química para el control de arvenses como Lorsban y Furadan, cuya acción herbicida disminuye la protección y el beneficio de las plantas que actúan como colchón ante la lluvia u otros agentes que ejercen presión sobre el suelo y, por tanto, se produce un incremento de la compactación. Al respecto, Brunel y Seguel (2011) encontraron que, en suelos con escasa protección superficial, se afecta significativamente la capacidad de transporte del agua, y atribuyen el efecto al bajo contenido de materia orgánica, la degradación de la estructura del suelo y la reducción de la porosidad.

Por otra parte, la estrecha correlación que se presenta entre la estabilidad y soporte físico y los agregados estables al agua, resulta importante cuando se trata de estimar la susceptibilidad del suelo a la erosión puesto que cuando el tamaño de las partículas de suelo se hace mayor, se afecta la agregación y la estabilidad de las mismas, lo que permite que las partículas de tamaño inferior sean más sensibles a los agentes erosivos y por tanto sean arrastradas (Salamanca y Sadeghian, 2005). Sin embargo, en este estudio solo se encontró una compensación altamente significativa entre la ESF y la RE ($r_s = -0.28$) en el caso del arreglo AA, en el cual la DA promedio fue significativamente diferente de TA y AC. Posiblemente, este tipo de interacción debe ser abordado con métodos que consideren la respuesta del cultivo ante un fenómeno erosivo de manera integral ya que la capacidad de los suelos para resistir fenómenos de erosión implica la participación de distintos parámetros físicos, químicos y biológicos en el proceso, y por lo tanto, atribuir tal servicio a una única característica física, puede no dilucidar una relación clara.

La estabilidad y soporte físico, se correlacionó negativamente con el servicio de fertilidad (F) en el arreglo AA ($r_s = -0.29$) y, con el almacenamiento de nitrógeno en MONO ($r_s = -0.32$) y en AA ($r_s = -0.38$). En los arreglos mencionados, se presentaron los valores de densidad aparente promedio más altos (0.79 g/cm^3 en AA y 0.84 g/cm^3 en MONO) y a pesar de que los valores de N y K fueron altos, estas concentraciones se le atribuyen a la fertilización asistida del suelo con productos como el Triple 15, Úrea, Platanero y KCL, con dosis que oscilan entre 20 y 200 g por planta (AA) y entre 80 y 150 g por planta (MONO), y que, en el caso de MONO, se emplean dos o más productos simultáneamente. Por lo tanto, aunque la disponibilidad de nutrientes en este caso se incrementa, la interacción no se ve favorecida positivamente por procesos naturales como la presencia de vegetación arvense (se erradica con métodos químicos) que beneficie las asociaciones de micorrizas en el suelo, y que estas a su vez, contribuyen con la disminución de la compactación del suelo por el efecto del enraizamiento.

Las correlaciones negativas significativas ($p < 0.05$) y altamente significativas ($p < 0.1$) entre la presencia y abundancia de macroinvertebrados con los SE de regulación asociados con variables físicas como la densidad aparente y estabilidad de agregados fueron más evidentes en los arreglos MONO y AC. De acuerdo con Pérez (1992) suelos bien agregados generalmente contienen una alta población de meso y macro-fauna, pues el proceso de transformación de la MO fresca aportada por la vegetación enriquece el horizonte superficial de humus, relacionado en su origen con la actividad de la fauna y flora del suelo. Sin embargo, en los arreglos mencionados, la utilización de plaguicidas como el Lorsban y Furadan, productos de alta toxicidad, además del uso de bolsas tratadas con clorpirifos que en su mayoría son dispuestas inadecuadamente, generan efectos adversos sobre las comunidades de macroinvertebrados del suelo (Gómez y López, 2016), y en consecuencia los beneficios de la actividad de la fauna edáfica sobre la descompactación del suelo se pierden, por lo que se propicia la concurrencia de interacciones de tipo compensación entre las variables físicas del suelo y la dinámica biológica del mismo.

Marín y Feijoo (2007) encontraron que en suelos menos perturbados se encuentran organismos exclusivos que cumplen funciones diversas y con regímenes alimenticios variados, como el caso de los miriápodos (Diplópodos) que cumplen con la función detritívora, por ejemplo, los órdenes Polyxenida y Polydesmida, mientras que en suelos cultivados estos macroinvertebrados desaparecen debido al estrés producido por la ausencia de vegetación, la pérdida de MO, las labores de manejo del suelo, la compactación del suelo, cambios en los regímenes de humedad y la aplicación de agroquímicos. Sin embargo, no encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre la abundancia y biomasa de los macroinvertebrados del suelo con las variables abióticas como humedad, densidad aparente, MO y N.

En contraposición con lo anterior, en el arreglo TA, las interacciones entre los servicios referidos correspondieron con interacciones neutras (0.03 y -0.04), probablemente la interacción no fue fuerte, porque en este tipo de arreglo, las labores de manejo son menos intensivas y las condiciones físicas y químicas del suelo se favorecen debido al aporte frecuente de biomasa y sombrero, aspectos que conforman el sustrato y combustible metabólico de macroinvertebrados especialmente miriápodos (Pardo et al., 2006). Esto puede relacionarse con los planteamientos de Marín y Feijoo (2007) al referir que el manejo menos intensivo del suelo, beneficia la estructura del mismo, favorece la actividad de los macroinvertebrados y, en consecuencia, le permite a este regenerarse con mayor facilidad de procesos que afecten las condiciones naturales del sistema.

En general, se observó que las sinergias, se presentaron principalmente entre los servicios asociados con la fertilidad y el balance de nutrientes y los servicios relacionados con la presencia y actividad de los macroinvertebrados. Sin embargo, a pesar de que la sinergia entre ambos servicios asociados con la biodiversidad, se evidenció en los cuatro arreglos con coeficientes por encima de 0.93 es importante considerar los valores en los que osciló el SE pues en el caso del arreglo TA se encontró mayor abundancia y biomasa de miriápodos con diferencias de hasta 37.6

individuos Ind.m^{-2} y $2.85 \text{ g.p.f.m}^{-2}$ respectivamente en comparación con el arreglo AC que presentó los valores más bajos (17.33 Ind.m^{-2} , $1.03 \text{ g.p.f.m}^{-2}$). Si bien la interacción es positiva en los cuatro arreglos, se destaca que en el arreglo TA la presencia y actividad de los macroinvertebrados puede verse favorecida por la alta disponibilidad de materia orgánica en el suelo, producto de las enmiendas orgánicas y el aporte de la vegetación arvense asociada con el cultivo.

Por otra parte, en relación con la dinámica del N en el cultivo plátano, ésta resulta de las transformaciones abióticas y bióticas que involucra el ciclo del N, y que como lo mencionan García *et al.* (2009) al tratarse de un sistema abierto, fertilizado de manera artificial, se generan perturbaciones en el ambiente en aras de incrementar la productividad, pero en los que ocurren pérdidas de N en el sistema superiores a las de los ecosistemas naturales, por efecto de la erosión, lixiviación, volatilización, y desnitrificación, factores que pueden conducir a serios problemas para el aprovisionamiento de importantes SE. Sin embargo, en los sistemas de producción bajo esquemas intensivos no se evidencian inmediatamente los efectos producidos por la degradación de los suelos agrícolas, pues estos efectos pueden ser “compensados temporalmente” por la alta aplicación de enmiendas o fertilizantes, y por tanto, los rendimientos del cultivo posiblemente no se vean afectados de manera radical (Brunel y Seguel, 2011); no obstante, en el largo plazo, la capacidad del suelo puede llegar a un punto en el cual no será suficiente para reponerse de los efectos del manejo intensivo y por consiguiente, esos suelos ya no serán productivos incluso incrementando el uso de fertilizantes y productos químicos.

Al respecto de lo anterior, Brussard *et al.* (1997) refieren que la disminución del potencial de mineralización del N se afecta fuertemente si decrece la actividad biológica en el suelo, debido a que alrededor del 90% de ese proceso es realizada por microorganismos que trabajan en conjunto con la macro y mesofauna. De tal manera que, resulta conveniente realizar un análisis más profundo de la interacción entre las comunidades de macroinvertebrados y la fertilidad del suelo, ante las intervenciones producidas de manera deliberada en el aporte de nutrientes con fertilizantes de síntesis química.

Por lo que se refiere al servicio de Producción de biomasa racimo (PBR) este se correlacionó negativamente con el balance de nutrientes en el arreglo TA (-0.33), mientras que en el caso del arreglo AA la interacción fue de tipo sinergia (0.40), posiblemente en el segundo caso, se debe a la aplicación más frecuente de fertilizantes y productos que aportan Mn y favorecen la maduración del fruto mientras que en el arreglo TA, otras variables pueden estar aportando de manera más significativa en la producción de los racimos más pesados entre los cuatro arreglos (15.85 kg). Por ejemplo, la ejecución de labores culturales que no se tuvieron en cuenta en el presente estudio, como el desmane y desbellote, las cuales pueden aportar significativamente a la diferenciación de la producción de biomasa de racimo (Gómez y López, 2016).

CONCLUSIONES

En el municipio de Armenia, se logró evidenciar que los arreglos de cultivo de plátano, alteran diferencialmente las interacciones entre los servicios ecosistémicos en función de las prácticas de manejo desarrolladas. En el caso del arreglo Tradicional Arbóreo, caracterizado por un manejo agronómico menos intensivo y la incorporación de cultivos de cobertura, se observó una tendencia hacia las interacciones neutrales, mientras que en el caso del Monocultivo y el Asociado con aguacate, el manejo intensificado y la utilización de productos agroquímicos favoreció la ocurrencia de compensaciones entre los servicios de regulación y los de aprovisionamiento asociados con la presencia y actividad de macroinvertebrados.

Las prácticas de manejo en el cultivo de plátano son diferenciadas de acuerdo con el arreglo, sin embargo, se reconoce la fuerte tendencia en el uso de productos de síntesis química, incluso en el arreglo Tradicional Arbóreo. Las opciones que utilizan los agricultores para el control de plagas y enfermedades, productos para la desinfección y herbicidas tienen efectos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por tal razón alteran la provisión de los servicios ecosistémicos regulación y aprovisionamiento. En ese sentido, el desarrollo de las prácticas debe orientarse al beneficio de las interacciones sinérgicas entre los servicios ecosistémicos al mejorar las condiciones de humedad en el suelo, la capacidad de transporte y drenaje, mejorar la cobertura del suelo, mayor disponibilidad de materia orgánica por medio de enmiendas con productos como el compost, pulpa de café, lixiviado de plátano; además del favorecimiento de la actividad biológica del suelo, la protección del suelo ante agentes erosivos y el proceso de balance de nutrientes.

La selección de las variables clave entre un amplio conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas que intervienen en la producción de servicios ecosistémicos en cultivares de plátano, permitió separar aquellas que representan aspectos críticos en el manejo de agroecosistemas, dada su sensibilidad al efecto de las prácticas agronómicas y su impacto sobre la dinámica de los SE. Además, el proceso de selección basado en criterios estadísticos y de sensibilidad permitió encontrar aquellas variables que logran separar los arreglos de cultivo y evidenciar la alteración en las interacciones entre SE.

El diseño metodológico propuesto recoge elementos usados en otros ambientes, pero que al ser adaptados al estudio del agroecosistema enriquecen el conocimiento asociado con la valoración de los SE desde el análisis de sus múltiples interacciones en entornos intervenidos por el hombre. La captura y análisis de información diversa obtenida mediante muestreos cuali-cuantitativos en cada una de las fincas clasificadas en los cuatro arreglos, el reconocimiento de las variables claves y su papel en la provisión de SE, la definición de los servicios ecosistémicos de aprovisionamiento y regulación soportada en la importancia de cada variable para el cultivo de plátano y su relación con el manejo del cultivo, los análisis de correlación entre dichas variables y la interpretación de

los impactos potenciales de las prácticas de manejo sobre la frecuencia y tipo de interacciones, contribuye de manera significativa con la búsqueda de nuevas metodologías para el estudio de los SE que integren elementos de diversas disciplinas y fortalezcan la capacidad de los actores sociales para tomar decisiones sobre el manejo de los agroecosistemas en la escalas local, regional y nacional.

La incorporación de elementos de análisis como los macroinvertebrados y su importante función en la dinámica de los SE y las aspectos físicos y químicos del suelo que interactúan para producir los servicios que los agricultores reciben de su entorno, constituye un factor sustancial para caracterizar las interacciones entre SE dada la capacidad indicadora de estos elementos para evidenciar posibles alteraciones y perturbaciones sobre la dinámica natural del ambiente. En consecuencia, se reitera la necesidad reconocer las interacciones entre servicios ecosistémicos desde el análisis de correlaciones y caracterizar los servicios de acuerdo con su potencial para generar compensaciones, sinergias o interacciones neutrales, y se plantea la posibilidad de complementar este tipo de estudios con métodos multivariados y multitemporales que permitan evaluar directamente el efecto de los agentes que ejercen presión sobre el sistema y que por tanto, condicionan la provisión de SE, así como la aplicación de este tipo de estudios para evaluar el potencial impacto de nuevos esquemas de producción sostenible sobre la dinámica de las interacciones.

REFERENCIAS

- Anderson, J. M. y Ingram, J.S.I, 1993. Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods, 2nd Ed. CAB International, Oxford.
- Arango Vargas, A. M. 2015. Efectos ambientales ocasionados por la técnica del embolsado de plátano en la producción agrícola del municipio de Ulloa–Valle. Trabajo de Grado Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Manizales, Caldas, Colombia. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas. 53 p.
- Arshad, M. A., y Martin, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 153-160.
- Bennett, E.M., Peterson, G.D., Gordon, L.J., 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecol. Lett.* 12 (12), 1394–1404. [online] URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x/epdf>
- Brunel, N. y Seguel, O. 2011. Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro sur*, 39(1), 1-12.

- Cabria, F., Calandroni, M. y Monterubbianesi, G. 2002. Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Ciencia del suelo* 20 (2): 69- 80.
- Campitelli, P., Aoki, A., Gudelj, O., Rubenacker, A. y Sereno, R. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 28(2), 223-231.
- Carpenter, S.R., Mooney, H.A., Agard, J., Capistrano, D., Defries, R.S., Diaz, S. et al., 2009. Science for managing ecosystem services: beyond the millennium ecosystem assessment. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 106, 1305–1312. [online] URL: <http://www.pnas.org/content/106/5/1305.full.pdf>
- Combatt, E. M., Martínez, G., y Barrera, J. L. 2004. Efecto de la interacción de N y K sobre las variables de rendimiento del cultivo de plátano (*Musa AAB simmonds*) en San Juan de Urabá- Antioquia. *Temas Agrarios*, 9(1).
- DANE, 2014. Insumos y factores de producción de plátano. [online] URL: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos_factores_de_produccion_abr_2014.pdf
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. [online] URL: <http://www.infostat.com.ar>
- Ehrlich, P., Ehrlich, A., 1992. The Value of Biodiversity, 21. *AMBIO*, Stockholm, pp.219–226 3. En Jopke, C., Kreyling, J., Maes J. & Koellner, T. 2015. Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns. *Ecological Indicators* 49 46–52. Elsevier. [online] URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.037>
- Feijoo, M. A. Castaño, J.M., Rivas, G.A., Lavelle, P., Zúñiga, M.C., Quintero, V. H., Murillo, B.E. y Molina, L.J., 2014. Servicios ecosistémicos generados por diversos arreglos de cultivo de plátano en el Eje Cafetero Colombiano. Proyecto de Investigación financiado por COLCIENCIAS. Grupo de investigación en Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P., 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecol. Econ.* 68 (3), 643–653. [online] URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800908004424>
- García, A., Díaz, R., Morón, A., Sawchik, J., y Quincke, A. 2009. El balance de N y la sostenibilidad de los agro ecosistemas. In Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas, Montevideo, Uruguay.

- Resúmenes expandidos. La Estanzuela: INIA. (Serie Actividades de Difusión (Vol. 587, pp. 7-16).
- Gliessman, S. R., Rosado-May, F. J., Guadarrama-Zugasti, C., Jedlicka, J., Cohn, A., Méndez, V. E., ... y Jaffe, R. 2007. Agroecología: promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Revista Ecosistemas*, 16(1).
- Gobernación del Quindío. 2015. Evaluaciones agropecuarias municipales. Departamento del Quindío. Informe agropecuario 2014-2015.
- Gómez, M. A. y López, M. A. 2016. Estilos de cultivar plátano en asocio con servicios ecosistémicos de aprovisionamiento del suelo, Armenia, Colombia. (Trabajo de grado) Programa de Administración Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi- IGAC. 2013. Estudio semidetallado de suelos Departamento del Quindío. Escala 1:25000. República de Colombia.
- Jopke, C., Kreyling, J., Maes J. & Koellner, T., 2015. Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns. *Ecological Indicators* 49 46–52. Elsevier. [online] URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.037>
- Klein, V. A., y Libardi, P. L. 2002. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 26(4), 857-867.
- Lavelle, P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecology Research* 27, 93– 132. Elsevier. [online] URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60007-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60007-0)
- Lee, H., y Lautenbach, S., 2016. A quantitative review of relationships between ecosystem services. *Ecological Indicators*, 66, 340-351. Elsevier. [online] URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.004>
- Marin, E.P y Feijoo, A. 2007. Efecto de la labranza sobre macroinvertebrados del suelo en vertisoles de un área de Colombia. *Terra Latinoamericana* 25: 297-310.
- Pardo, L. C., Vélez, C.P, Sevilla, F. y Madrid, O. 2006. Abundancia y biomasa de macroinvertebrados edáficos en la temporada lluviosa, en tres usos de la tierra, en los Andes colombianos. *Acta Agron.*, 55 (1): 43-54
- Pérez, A. J. 1992. Estudio de la estabilidad estructural del suelo en relación con el complejo de cambio (comportamiento de algunos suelos característicos españoles) (Doctoral dissertation, Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España).

- Millennium Ecosystem Assessment (MA). 2003. Ecosystems and their services. Chapter 2 in Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Island Press, Washington, D.C., USA.
- Millennium Ecosystem Assessment (MA). 2005a. Ecosystems and human well-being: multiscale assessments. Island Press, Washington, D.C., USA.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). 2005. La cadena de plátano en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Observatorio Agrocadenas Colombia, enero de 2006. pp. 2. Bogotá. [online] URL: <http://www.asohofrucol.com.co/archivos/cadenas/platano.pdf>
- Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tan, C. S., & Lu, X. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110(1), 131-146.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M., & Tan, C. S. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146(3), 466-474.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3), 252-263.
- Rivera, H. 1999. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. Compendio de Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, Colombia.
- Robinson, J. C., y Saúco, V. G. 2010. Bananas and plantains (2 Ed). (Vol. 19). CABI International.
- Rodríguez, J.P., Beard, T.D., Bennett, E.M., Cumming, G.S., Cork, S.J., Agard, J. et al. 2006. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecol. Soc.*, 11(1):28. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art28>
- Rousseuw, P.J., Ruts, I. y Tukey, J.W. 1999. The Bagplot: A Bivariate Boxplot, *The American Statistician*, 53:4, 382-387. [online] URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00031305.1999.10474494>
- Salamanca, J. y Sadeghian, KH S. 2005. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 56 (4): 381-397.
- Secretaría de Agricultura Departamento del Quindío. 2014. Evaluaciones agropecuarias municipales Informe Agropecuario, Años 2012 y 2013. Armenia-Quindío

- Sinha, N. K., Mohanty, M., Meena, B. P., Das, H., Chopra, U. K., y Singh, A. K. 2014. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the arid ecosystem of India. *African Journal of Agricultural Research*, 9(2), 285-293.
- StatSoft, Inc. 2007. STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. [online] URL: www.statsoft.com.
- Thomsen, M., Faber, J. H., y Sorensen, P. B. 2012. Soil ecosystem health and services—Evaluation of ecological indicators susceptible to chemical stressors. *Ecological Indicators*, 16, 67-75.
- Tisdall, J. y Oades, J. 1982. Organic matter and waterstable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Torres, R. A., Vera, M.E. y Castaño R, E. 2013. Evaluación ambiental de la práctica "embolsado" en plátano (*Musa AAB simmonds*). Quindío, Colombia. *Luna azul*, (36), 91-109.
- Valdez, C. V. y Ruiz, L.A. 2011. Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*. Enero 2012 Vol.1 Núm. 4 Año 2. pp 3-15. [online] URL: <http://biociencias.uan.edu.mx/publicaciones/02-04/biociencias4-1.pdf>
- Volverás, M. B., y Amézquita, C. E. 2009. Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta agronómica*.
- Zúñiga, M. C., Feijoo, A., Quintero, H., Aldana, N. J., y Carvajal, A. F. 2013. Farmers' perceptions of earthworms and their role in soil. *Applied soil ecology*, 69, 61-68.