



Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales¹

Ecosystem-based adaptation: effect of shade trees on ecosystem services in coffee plantations

Rogelio Villarreyna², Jacques Avelino^{2,3}, Rolando Cerda²

- ¹ Recepción: 10 de junio, 2019. Aceptación: 3 de diciembre, 2019. Este trabajo formó parte del proyecto CASCADA (Adaptación basada en Ecosistemas para pequeños productores de subsistencia y café en América Central) de la Iniciativa Internacional por el Clima (ICI), financiada por el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear (BMUB) del Gobierno de la República de Alemania.
- ² Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Apdo. 7170, Turrialba, Costa Rica. rvillareyna@catie.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-5347-6892>), javelino@catie.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0003-1983-9431>), rcerda@catie.ac.cr
- ³ Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD), Montpellier, Francia. jacques.avelino@cirad.fr (<https://orcid.org/0000-0003-1983-9431>).

Resumen

Introducción. El manejo de árboles de sombra en un sistema de producción se considera una práctica de adaptación basada en ecosistemas capaz de proveer múltiples servicios ecosistémicos. **Objetivo.** Contribuir al entendimiento de los efectos de los árboles en cafetales sobre servicios ecosistémicos de aprovisionamiento y regulación, y cómo el análisis de relaciones entre servicios puede contribuir a mejorar el diseño y manejo de estos sistemas. **Desarrollo.** El estudio se realizó entre julio y octubre de 2017. Los árboles de sombra tienen un efecto sobre el rendimiento de café, atribuido a su influencia en la regulación de la carga fructífera. Este efecto puede tener resultados positivos con un manejo agroforestal adecuado, pues reduciría fluctuaciones bienales extremas de la producción de café. Los árboles también regulan el clima dentro del cafetal (microclima), además, tienen efectos positivos sobre la fertilidad del suelo, la cantidad de materia orgánica, el reciclaje de nutrientes, disminuyen la evaporación del suelo, reducen la erosión y secuestran carbono. Sin embargo, hay algunos aspectos que aún siguen siendo complejos y a veces contradictorios. En general, la documentación de los aspectos positivos de los árboles sobre servicios de aprovisionamiento y regulación son mayores que los negativos. **Conclusión.** Esta revisión evidencia un efecto de los árboles de sombra sobre los servicios ecosistémicos. El conocimiento de dichos efectos, con base en el interés y expectativas de los sistemas sociales, debe ser complementado con análisis de relaciones entre servicios con miras a identificar mejores prácticas agroforestales o sistemas modelo capaces de proveer varios servicios simultáneamente.

Palabras clave: agroforestería, árboles de propósito múltiple, *Coffea*.

Abstract

Introduction. The management of shade trees in a production system is considered an ecosystem-based adaptation practice capable of providing multiple ecosystem services. **Objective.** Contribute to the understanding of



the effects of trees in coffee plantations on ecosystem services for provisioning and regulation and how the analysis of relationships between services can contribute to improve the design and management of these systems. **Development.** The study was carried out between July and October 2017. Shade trees have an effect on coffee yield, attributed to their influence on the regulation of fruit load. This effect can have positive results with an adequate agroforestry management, as it would reduce extreme biennial fluctuations in coffee production. The trees also regulate the climate within the coffee plantation (microclimate), in addition, they have positive effects on soil fertility, the amount of organic matter, the recycling of nutrients, decrease soil evaporation, reduce erosion and sequester carbon. However, there are some aspects that are still complex and sometimes contradictory. Overall, the documentation of the positive aspects of the trees on provisioning and regulation services is greater than the negative ones. **Conclusion.** This review shows an effect of shade trees on ecosystem services. Knowledge of these effects, considering the interest and expectations of the social systems, must be complemented with analysis of relationships between services with the aim to identifying best agroforestry practices or model systems that can provide multiple services simultaneously.

Key words: agroforestry, multipurpose trees, *Coffea*.

Introducción

En los últimos años se ha propuesto la adaptación basada en ecosistemas (AbE) como una opción ante los cambios en el clima. La AbE se define como la utilización de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos como parte de una estrategia de adaptación a los efectos adversos del cambio climático (SCBD, 2009). En los sistemas agropecuarios, se pueden usar prácticas de AbE para aprovechar la biodiversidad, los servicios de los ecosistemas o los procesos ecológicos (a nivel de parcela o paisaje), con el fin de ayudar a aumentar la capacidad de los cultivos o el ganado, y por ende, a familias productoras para adaptarse a la variabilidad climática (Jackson et al., 2010).

Las prácticas de AbE deben basarse en la conservación, la restauración o el manejo de la biodiversidad (a nivel genético, de especies o de ecosistemas), y deben fundamentarse en los procesos y servicios ecosistémicos. El manejo de árboles y otras plantas asociadas a un cultivo principal en sistemas agroforestales es considerado como una práctica de AbE. Esta ayuda a conservar la estructura del suelo, los nutrientes, provisiona agua, entre otros beneficios (Vignola et al., 2015). Además, se reconoce que los árboles de sombra contribuyen a la conservación de la biodiversidad vegetal y animal, y al secuestro de carbono de la atmósfera, aportando así a la mitigación del cambio climático (Somarriba et al., 2013; Deheuvels et al., 2014). También es conocida su utilidad para proteger los cultivos de fuertes vientos, altas temperaturas y períodos de sequía prolongados (Jha et al., 2014).

El café (*Coffea arabica*), uno de los productos agrícolas más exportados en el mundo, es producido principalmente en sistemas agroforestales. En la mayoría de los países de la región centroamericana, más del 90 % del café se cultiva bajo sombra (Sosa-López y Ordoñez, 2001; Solórzano-Lanzas y Cáceres-Trujillo, 2012). El uso de árboles en este sistema tiene su fundamento en factores eco-fisiológicos, económicos y de mercado (Beer et al., 1998; Lin, 2007; Méndez et al., 2010). Aunque históricamente se ha debatido la conveniencia de cultivar el café a pleno sol o en asocio con árboles (Samper, 1999).

Actualmente se reconoce que los sistemas agroforestales pueden proporcionar diversos servicios ecosistémicos. A pesar de ello, existe todavía una comprensión limitada de cómo los árboles de sombra pueden afectar la provisión de múltiples servicios ecosistémicos y de los posibles compromisos (trade-offs) o sinergias entre ellos (José, 2009, Cerda et al., 2016). Esa información se considera esencial para el diseño de sistemas agroforestales óptimos que puedan cumplir con los servicios de más interés para los productores (Rapidel et al., 2015b).

Así como hay múltiples beneficios de los árboles, también se ha documentado que pueden tener algunos efectos no deseados en el sistema si no son manejados correctamente. Por ejemplo, el rendimiento de los cafetos

bajo sombra puede ser inferior al de los sistemas a pleno sol (López-Bravo et al., 2012), al menos en el corto plazo. El aumento de la sombra, a partir de niveles excesivos (manejo inadecuado), trae consigo mayor competencia por luz, agua y nutrientes del suelo entre los árboles y el cultivo principal, lo que conlleva a reducir el rendimiento relativo de este último (Zuidema et al., 2005). Además, los sistemas agroforestales requieren mayor cantidad de mano de obra y pueden favorecer el ataque de algunos patógenos e insectos, en dependencia de la estructura, composición y manejo que se les brinde a los árboles (Villarreyna-Acuña, 2016a).

Entender la provisión de servicios ecosistémicos de los árboles de sombra en un sistema agroforestal es importante para el sector cafetalero de la región centroamericana, con miras a la sostenibilidad de la producción. La producción de café en Centroamérica se encuentra todavía en una crisis severa, pues una cadena de eventos, incluyendo la volatilidad de los precios, incremento en los costos de producción, difícil acceso a mercados, aumento en el daño causado por plagas y patógenos, principalmente la roya del café (*Hemileia vastatrix*), han provocado una reducción significativa de la producción desde el 2012 (Avelino et al., 2015). A los eventos mencionados se suma el cambio climático que contribuye a la vulnerabilidad de los caficultores centroamericanos. El café es muy sensible a los cambios del clima (Bunn et al., 2015), por lo que se espera que estos tengan impactos significativos en el cultivo.

Con base en la realidad que enfrenta la caficultura hoy en día y los cambios del clima a futuro, es necesario considerar las prácticas que contribuyan a la adaptación de los cafetales a cambios climáticos y socioeconómicos. El manejo de árboles de sombra en los cafetales se presenta como una buena medida de adaptación para amortiguar los efectos de eventos climáticos extremos, y reducir los riesgos que enfrenta la caficultura del futuro. Por lo tanto, esta revisión tuvo como objetivo contribuir al entendimiento de los efectos de los árboles en cafetales sobre servicios ecosistémicos de aprovisionamiento y regulación, y cómo el análisis de relaciones entre servicios puede contribuir a mejorar el diseño y manejo de estos sistemas.

Los servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas y según Millennium Ecosystem Assessment (2005) y TEEB (2015) se clasifican en las siguientes categorías: (I) servicios de provisionamiento: alimentos para el consumo humano (frutas, granos, miel, hongos, peces, algas), materia prima (madera para construcción, leña, aceites), medicinas (compuestos bioquímicos), abastecimiento de agua (agua dulce); (II) servicios de regulación: regulación climática, de la calidad del aire, el secuestro y almacenamiento de carbono, moderación de efectos de eventos extremos, prevención de la erosión, mantenimiento de la fertilidad del suelo, regulación de plagas y enfermedades, control biológico, tratamiento de aguas residuales y polinización; (III) servicios culturales: espiritual, religioso, recreación, salud física y mental, turismo, apreciación estética e inspiración para el arte y educacional; y (IV) servicios de soporte: hábitat de especies y el mantenimiento de la diversidad genética. Estos son servicios básicos que mantienen y aseguran adecuadamente los ecosistemas, y permiten el flujo de los demás servicios mencionados.

Aunque los sistemas agroforestales son capaces de proporcionar servicios de los cuatro tipos, esta revisión se enfoca en el efecto de los árboles sobre dos de ellos: aprovisionamiento y regulación, por ser los que cuentan con más y mejor documentación en cafetales.

Los árboles de sombra como prestadores de servicios ecosistémicos de aprovisionamiento dentro del sistema agroforestal de café

Los servicios de aprovisionamiento son los productos obtenidos, es decir, son los bienes o materiales tangibles (ejemplo: café, frutas, madera) con beneficios directos para las personas. Estos servicios dan el sustento básico de la vida humana y a menudo tienen valor monetario (Balvanera et al., 2009). Además de los productos tradicionales

como los alimentos (cosecha), las fibras, la madera y la leña, se incluyen los compuestos bioquímicos. Los árboles de sombra asociados al café pueden tener un efecto directo e indirecto sobre el aprovisionamiento, lo cual se explica en las secciones o acápite siguientes.

Efecto directo de los árboles de sombra sobre el servicio ecosistémico de aprovisionamiento

Con respecto al crecimiento, los cafetales bajo sombra mantienen sus hojas durante la época seca y comienzan el proceso de revestimiento con el inicio de las lluvias. Por el contrario, los cafetales a pleno sol pierden rápidamente sus hojas en el verano y comienzan el proceso de revestimiento aún antes de las lluvias (Guharay et al., 2000). La sombra puede provocar cambios en la morfología foliar de los cafetos, generan aumento del área individual de las hojas, reducción del espesor de estas, menor número de estomas por cm^2 y la relación parte aérea/raíz tiende a ser mayor y se da una reducción en el área basal de las plantas (IICA, 1988). La velocidad a la que las hojas de los cafetos se renuevan tiende a ser menor bajo sombra en comparación con pleno sol (Estivariz, 1997; Siles et al., 2010; López-Bravo et al., 2012).

Durante la floración, la sombra evita la quema directa por luz solar de los botones florales, lo que puede aumentar el cuaje de los mismos (IICA, 1988). En café con porcentajes de sombra de 40 a 60 % (especie *Erythrina* sp.) se encontró una eficiencia de 1,6 (por cada dieciséis flores, diez se convirtieron en fruto) de conversión de flor a fruto, mientras que cafetales con menos del 20 % de sombra de la misma especie mostraron una menor eficiencia con 1,8 (por cada dieciocho flores, diez se convirtieron en fruto) (Estivariz, 1997). Sin embargo, a pleno sol es mayor el número de flores que brotan (IICA, 1988).

La sombra ayuda a evitar floraciones dispersas, es decir, puede atrasarlas y concentrarlas en un mayor porcentaje en la floración principal, mientras que a pleno sol puede haber tendencia a adelantarse (Angrand et al., 2004). Así, bajo sombra se podría tener menos flores que a pleno sol, pero estarían mejor protegidas y lograrían mayor cuaje. También se sugiere que la sombra no debería ser excesiva, sino suficiente como para permitir entrada de luz que estimule a la floración y al mismo tiempo proteja las flores (Angrand et al., 2004).

En cuanto a la producción, se conoce que la sombra contribuye a la diversificación de los sistemas cafetaleros y a mejorar la provisión de varios servicios ecosistémicos. Sin embargo, los estudios también demuestran un claro efecto de esta sobre la reducción de la carga fructífera (DaMatta y Rodríguez, 2007; López-Bravo et al., 2012; Avelino y Rivas, 2013). Dicho de otro modo, a través de la sombra se puede regular el rendimiento de los cafetos (Perfecto et al., 2005; Malézieux, 2012). Los nudos fructíferos de los cafetos dependen en gran parte de la fotosíntesis, por lo que en condiciones de sombra el número podría ser inferior (25 % menos) a los cultivos a pleno sol (Campanha et al., 2005). Sin embargo, Angrand et al. (2004) no encontraron diferencias estadísticamente significativas en cafetales de cuatro años con sombra de *Erythrina poeppigiana* y *Terminalia ivorensis* versus pleno sol en Costa Rica (21 nudos totales y 8 nudos productivos por bandola en los tres sistemas).

En cafetales con sombra de *Erythrina* sp, la producción potencial de frutos por cafeto fue un 41 % menor, con una cobertura de sombra de 40 a 60 % (1091 frutos por planta), en comparación con aquellos que tenían un máximo de 20 % de cobertura (1838 frutos) (Estivariz, 1997). Resultados similares encontraron Siles et al. (2010), con reducciones del rendimiento bajo 38 % sombra (*Inga* sp.) en comparación con cafetales sin sombra. Esto puede explicarse por las presiones bióticas (plagas y enfermedades) (Perfecto et al., 2005) y la menor luminosidad que entra bajo el sistema con árboles (Rapidel et al., 2015a).

Se reportó un desarrollo más lento del grano bajo sombra, en comparación con café a pleno sol. Una maduración más tardía bajo sombra favorece a que sean más uniformes y con mayor tamaño; también se ha encontrado que permite obtener frutos más sanos, libres de daños por quemaduras, lo que se traduce en mejor calidad para la exportación (IICA, 1988; Guyot et al., 1996). Se ha mencionado que la reducción del rendimiento por la sombra depende del porcentaje de cobertura de sombra que se maneje en el cafetal. Se han observado mejores rendimientos

con cobertura de sombra entre 30 y 45 % (Soto-Pinto et al., 2000). Porcentajes de sombra menores y mayores a este rango mostraron menores rendimientos del cultivo principal (Soto-Pinto et al., 2000), lo que también había sido observado por Muschler (1997a) (mejores rendimientos con 40 % de cobertura). En un estudio realizado en Masatepe, Nicaragua, se encontraron rendimientos de café similares bajo sombra (*Inga laurina* + *Samanea saman* y *Simaruba glauca* + *Tabebuia rosea*) que a pleno sol, ambos sistemas bajo un manejo convencional intensivo (Moraga-Quezada et al., 2011).

En cafetales de Costa Rica no se encontraron diferencias de rendimiento en sistemas con sombra (diversificada y moderada) (< 30 % de cobertura) y a pleno sol. Por el contrario, encontraron que hay un efecto directo de la intensidad de manejo sobre el rendimiento, independientemente del sistema utilizado (Cerda et al., 2016). Por lo tanto, si ambos sistemas (sombra y sol) se manejan con igual intensidad (usando los insumos adecuados) los rendimientos pueden ser similares, considerando un porcentaje de cobertura de 30 - 40 % para el sistema con árboles.

Los cafetales con árboles pueden permitir una producción más sostenible y con menor dependencia de insumos externos en comparación con la producción a pleno sol (Herzog, 1994). Los costos para incrementar la intensidad de manejo son más altos en monocultivo de café, debido a que este sistema demanda una mayor cantidad de agroquímicos (principalmente más fertilizantes y herbicida que el sistema diversificado), lo que tiene un efecto en los beneficios obtenidos por las familias productoras (Muschler, 1999; Cerda et al., 2016). También es importante recalcar el efecto de la sombra sobre la reducción de la bienalidad, lo cual permite obtener producciones similares cada año (DaMatta, 2004).

Con respecto a los productos adicionales, estudios recientes (Pinoargote et al., 2016; Cerda et al., 2016), analizaron diferentes sistemas de producción de café: a pleno sol, con sombra moderada (una especie de sombra + especie herbácea) y con sombra diversificada (más de cinco especies). Dichos estudios hacen alusión a los principales productos adicionales brindados por los árboles asociados al café (incluyendo los productos obtenidos de herbáceas), tales como: leña, frutas, madera, banano, plátano, entre otros. Asimismo, se cuantificaron los rendimientos, costos de producción e ingresos de todo el sistema agroforestal, incluyendo el café como cultivo principal, concluyendo que el manejo bajo sombra moderada presenta rendimientos similares (e inclusive mayores en un 3 %) que el café a pleno sol (Pinoargote et al., 2016) (Cuadro 1).

Efecto indirecto de los árboles de sombra sobre el servicio ecosistémico de aprovisionamiento

El efecto indirecto de los árboles de sombra sobre el servicio ecosistémico de aprovisionamiento se analiza en esta sección desde el punto de vista de los factores que afectan el rendimiento del café tales como: suelo, plagas y patógenos, arvenses (o malas hierbas) y enemigos naturales.

La fertilidad del suelo es importante para mantener los rendimientos del café. Se ha evidenciado el valioso aporte del fósforo (P) y el potasio (K) en el desarrollo de la flor (P) y el fruto (K) de los cafetos (Wang et al., 2015). Los árboles de sombra favorecen el contenido de materia orgánica del suelo y la riqueza nutricional del mismo (Muschler, 1999), aumentan el contenido de K y Mg (Porrás-Vanegas, 2006; Cerda et al., 2016), lo cual se explica más adelante en el servicio de regulación de la fertilidad. Asimismo, tienen un efecto positivo en el reciclaje de nutrientes, sobre todo en los procesos de mineralización y nitrificación, uno de los elementos fundamentales en los rendimientos del café (Villarreyna-Acuña, 2016b). Por lo anterior, los árboles a través de su efecto directo sobre el suelo tienen un efecto indirecto sobre el rendimiento del café, aunque los estudios no muestran qué porcentaje de este podría ser atribuido a la fertilidad del suelo.

El microclima bajo el dosel de los árboles de sombra puede crear condiciones favorables para ciertas plagas y patógenos y de esta manera, tener un efecto indirecto sobre el rendimiento. Aunque ese ambiente creado también puede resultar no favorable para otros agentes maléficis para el café, lo cual se explica con mayor detalle en el servicio ecosistémico de regulación. Las plagas y patógenos pueden ocasionar pérdidas en café desde un 26 %

Cuadro 1. Producción agroforestal e índices financieros en diferentes tipos de plantaciones de café (pleno sol/monocultivo y diversificados). Pinoargote et al. (2016).

Table 1. Agroforestry production and financial indices in different coffee plantation types (full sun/monoculture and diversified). Pinoargote et al. (2016).

Producto	Unidad de medida	Café a pleno sol (monocultivo)	Café con sombra moderada*	Café diversificado con árboles**
Café	kg ha ⁻¹ año ⁻¹	1711±751	1760±652	1002±248
Leña	m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹	0	1,1±0,9	1,9±1,9
Bananos	kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0	664±325	1738±1234
Cítricos	unidades ha ⁻¹ año ⁻¹	0	1815±5097	23411±45472
Otros frutales***	unidades ha ⁻¹ año ⁻¹	0	36±101	3678±5848
VMP	m ³ ha ⁻¹	0	0,4±0,6	4,3±5,8
VMPC	USD ha ⁻¹	0	42±85	276±277
Índices financieros				
Ingresos brutos	USD ha ⁻¹ año ⁻¹	4566±2427	4199±1554	3075±1660
Costos en efectivo	USD ha ⁻¹ año ⁻¹	1753±629	1393±1076	1188±400
Flujo de caja neto	USD ha ⁻¹ año ⁻¹	2813±2014	2806±1007	1887±1422
Ingresos netos	USD ha ⁻¹ año ⁻¹	2759±2051	2113±1212	1389±980
Consumo interno	USD ha ⁻¹ año ⁻¹	0±0	170±166	654±480
Beneficio familiar	USD ha ⁻¹ año ⁻¹	2813±2014	2977±1094	2541±1808

*Sistema agroforestal de café asociado con bananos y árboles de servicio. **Sistema agroforestal de café diversificado con árboles de servicio, maderables, frutales y bananos. ***Otros frutales como: aguacate (*Persea americana* Mill), mango (*Mangifera indica* L), anona (*Annona muricata*), jocote (*Spondias purpurea*), carambola/melocotón (*Averrhoa carambola* L.), entre otros de menor importancia. VMP= volumen de madera en pie comerciable. VMPC= valor de madera en pie comerciable / Coffee agroforestry system associated with banana and service trees. ** Diversified coffee agroforestry system with service trees, timber, fruit trees, and banana. ***Other fruits like: avocado (*Persea americana* Mill), mango (*Mangifera indica* L.), annona (*Annona muricata*), jocote (*Spondias purpurea*), starfruit/carambola (*Averrhoa carambola* L.), among others of minor importance. VMP: volume of marketable standing timber. VMPC: value of marketable standing timber.

(pérdidas primarias) hasta un 38 % (pérdidas secundarias) (Cerda et al., 2017). Las pérdidas secundarias pueden, inclusive, llegar a ser más del doble que las primarias, principalmente cuando hay una severa defoliación en el año anterior por fuertes ataques en ese mismo año (Cerda, 2017). Estos agentes perjudiciales están influenciados por factores como: altitud, clima, sombra, manejo, características de la planta, entre otros, por lo tanto, los daños causados no son atribuible solo al efecto de la sombra (Allinne et al., 2016).

La incidencia de arvenses, particularmente gramíneas agresivas, puede ser disminuida más de un 40 % e inclusive hasta un 95 % (sombra densa) a través de la sombra y la barrera que forma la hojarasca (impidiendo su germinación) de los árboles asociados al cafetal (Muschler, 1997b; 1999; Thériez, 2015). Eso significa, además, una reducción en los costos que incurre el control de estas (DaMatta y Rodríguez, 2007). Las arvenses pueden reducir el rendimiento desde un 35 % hasta un 66 % (sin control total), por competencia con el cultivo (Salazar e Hincapié, 2007). Por lo tanto, el efecto de la sombra sobre la reducción en cantidad y agresividad de las malas hierbas incide positivamente en el rendimiento de una manera indirecta.

Agentes de biocontrol, como *Beauveria bassiana* para la broca o *Lecanicillium lecanii* para el hongo responsable de la roya (*Hemileia vastatrix*), pueden encontrar condiciones adecuadas para su sobrevivencia y proliferación en

los sistemas agroforestales (Staver et al., 2001). Ese efecto favorable de la sombra para los enemigos naturales de ciertas plagas y patógenos, tendría una repercusión indirecta y positiva sobre el rendimiento de los cafetos.

Los árboles de sombra como prestadores de servicios ecosistémicos de regulación, dentro de los sistemas agroforestales (SAF) de café

Los servicios ecosistémicos de regulación son procesos complejos, mediante los cuales se regulan las condiciones del ambiente en que los seres humanos realizan sus actividades (Balvanera et al., 2009). Los árboles de sombra asociados al café juegan un papel importante como prestadores de servicios ecosistémicos de regulación. En esta sección se explica el efecto directo de estos sobre el ajuste del clima, la erosión, fertilidad del suelo, control biológico de plagas y enfermedades, humedad del suelo y el carbono dentro del cafetal.

Regulación del clima (microclima)

El efecto regulador del microclima de los árboles de sombra en cafetales ha sido estudiado desde décadas atrás. Los cambios que ocurren bajo el dosel de sombra se dan sobre la cantidad y calidad de luz que entra al sistema, la temperatura del aire, del suelo y del área foliar (hojas del cafeto), la velocidad del viento, la humedad del suelo y la evaporación del agua del suelo (IICA, 1988; Lin, 2007; Cannavo et al., 2011; López-Bravo et al., 2012). También se dan cambios importantes sobre el impacto de la lluvia bajo el dosel (Avelino y Rivas, 2013; Villarreyna-Acuña, 2016b); es así como la radiación solar que llega al cafeto se reduce en dependencia del tipo de copa de los árboles utilizados (Beer et al., 1998; Lin, 2007; Siles et al., 2010). Las temperaturas máximas del aire, de las hojas de los cafetos y del suelo, disminuyen bajo sombra, lo mismo que el rocío, mientras que la humedad relativa del aire tiende a aumentar (Lin, 2007; López-Bravo et al., 2012).

La velocidad del viento y la intensidad de la lluvia pueden reducirse al interior de un sistema agroforestal. El viento es interceptado por las copas de los árboles y así reduce su velocidad (IICA, 1988). Con respecto a la lluvia, el dosel de sombra la intercepta y puede disminuir su intensidad y el escurrimiento superficial bajo el mismo (Véliz-Chávez et al., 2012), especialmente en caso de pequeñas lluvias (< 5 mm por hora medidos cada 10 min). Sin embargo, esto puede ser controversial, debido a que las hojas de los árboles acumulan el agua de la lluvia y forman gotas de mayor tamaño, las cuales, cuando rebalsan de la hoja (eso sucede cuando las lluvias son más abundantes, < 5 mm), pueden provocar mayor impacto sobre las hojas de los cafetos. La energía cinética de las gotas (tamaño y velocidad) depende de la altura del dosel y especie de árboles (Avelino y Rivas, 2013; Villarreyna-Acuña, 2016b). Por ejemplo, el uso de especies como *Cordia alliodora* puede aumentarla (Cerdán et al., 2012), mientras otras como *Inga edulis* e *Inga densiflora* tienden a disminuirla, debido posiblemente a su tipo de copa que intercepta más la lluvia y la distribuye a lo largo de las ramas y del tronco (Villarreyna-Acuña, 2016b).

Regulación de las principales plagas, patógenos y enemigos naturales de estas

Los efectos de los árboles de sombra sobre las plagas y patógenos dependen de los requerimientos del insecto o del patógeno considerado, así como también de sus agentes de control. De manera general, estos efectos son complejos y muchas veces contradictorios. Al respecto Mouen-Bedimo et al. (2008) y López-Bravo et al. (2012), mencionaron algunos mecanismos de interacción entre la sombra y las plagas y patógenos:

- a) Aumento de los nichos, a través de la incorporación de árboles de sombra: al aumentar las especies arbóreas y hacerse más compleja la estructura del dosel en el cafetal, se proveen nichos para que coexista un mayor número de individuos, incluyendo especies de aves (*Setophaga petechia*, *Troglodytes aedon*, *Todirostrum*

cinereum, entre otras) que pueden hacer biocontrol sobre algunas plagas del cafeto como la broca del café (*Hypothenemus hampei*) (Armbrecht y Gallego, 2007; Kellermann et al., 2008; Martínez-Salinas et al., 2016). Inversamente, los árboles también pueden ser huéspedes alternos para plagas y patógenos, como se ha demostrado para el hongo que provoca el ojo de gallo del café (*Mycena citricolor*) (Granados-Montero, 2015). Incluso para la broca del café, se ha comprobado que el coleóptero puede refugiarse y reproducirse en otras frutas que no sean las cerezas del café (Damon, 2000).

- b) Alteración del microclima: los árboles de sombra modifican las condiciones del microclima, y puede ayudar a regular ciertas plagas y patógenos, pero también favorecer otras. Por ejemplo, reducen la velocidad del viento en el cafetal (Beer et al., 1998), y así probablemente desfavorecen a patógenos que son transportados por este como la roya del café (Avelino et al., 2011). Ese efecto sobre el viento también ayuda a proteger las hojas del cafeto contra daños mecánicos que facilitan la entrada de hongos oportunistas (Rapidel et al., 2015a). El aumento de la energía cinética de las gotas de lluvia (explicado en la regulación del clima) puede favorecer la dispersión de esporas de roya (Pico-Rosado, 2014). Sin embargo, la disminución (de la energía cinética), ocasionada por otras especies, puede reducir el “splashing” (dispersión por salpique) (Villarreyna-Acuña, 2016b).

En el Cuadro 2 se presenta un resumen de cómo la sombra a través del microclima puede favorecer ciertos procesos del desarrollo de un patógeno y desfavorecer otros procesos de este. Esto ayuda a dar una idea de lo complejo que puede ser analizar estas interacciones (sombra – plagas y patógenos). Se muestra un ejemplo con *Hemileia vastatrix*, agente causal de la roya del café, aprovechando varios años de seguimiento y de exhaustiva revisión bibliográfica realizada por Avelino y Rivas (2013). Estos efectos complejos de la sombra pueden seguir un patrón similar en otras plagas (broca, minador, etc.) y patógenos causantes de enfermedades como ojo de gallo, antracnosis, entre otras de importancia para la caficultura (Villarreyna-Acuña, 2016a).

La sombra, a través de su efecto regulador de la carga fructífera, ayuda a eliminar casi totalmente la antracnosis asociada a hongos del género *Colletotrichum* (Rapidel et al., 2015a) y podría ayudar a reducir la incidencia y severidad de roya del café favorecida por una mayor carga fructífera (López-Bravo et al., 2012). Se encontró menos roya, menor cantidad de ramas muertas y menos severidad de plagas y patógenos (de manera general) en café cultivado bajo sombra diversificada versus monocultivo, ambos sistemas (sol y sombra) con manejo óptimo (Cerdeira et al., 2016). Otro estudio realizado sugiere que el impacto de la roya bajo sombra podría ser menor que a pleno sol, cuando se trata de epidemias severas como la ocurrida en el año 2012 en Centroamérica. Durante esa epidemia se observaron plantaciones altamente atacadas por roya en ambos sistemas, pero con una mayor defoliación y muerte de ramas a pleno sol (Avelino et al., 2015). Posiblemente, el estrés de las plantas a pleno sol (altas temperaturas en especial), hizo que estas sufrieran más los ataques de la roya.

Agentes de biocontrol, como *Beauveria bassiana* para la broca o *Lecanicillium lecanii* para el hongo responsable de la roya del café, pueden encontrar en los cafetales con sombra condiciones adecuadas para su sobrevivencia y proliferación (Staver et al., 2001; Pico-Rosado, 2014).

Secuestro y almacenamiento de carbono

Los árboles representan una reserva de dióxido de carbono (CO₂) acumulada a lo largo de años de fotosíntesis. Los ecosistemas terrestres acumulan tres veces más carbono (1/5 en la vegetación, 4/5 en el suelo) que la atmósfera (Houghton, 2006).

El secuestro de carbono en sistemas agroforestales con café es más intenso que plantaciones en monocultivo (Harmand et al., 2006). Se encontró 29,8 Mg ha⁻¹ más de carbono presente en la biomasa aérea de parcelas de café con árboles de sombra (maderables, frutales y de servicio) y musáceas, en comparación con plantaciones a pleno sol

Cuadro 2. Efectos potenciales de la sombra sobre la roya del café, a través del microclima, con base en los factores climáticos de mayor relevancia. Avelino y Rivas (2013).

Table 2. Potential effects of shade on coffee rust, through the microclimate, considering the climatic factors of greater relevance. Avelino y Rivas (2013).

Factor climático	Proceso de la enfermedad afectado	Efecto potencial de la sombra sobre la enfermedad	Explicación
Temperatura	Germinación Penetración Colonización	+	La sombra regula las temperaturas. Particularmente, las temperaturas máximas de las hojas son más bajas que a pleno sol y se mantienen más cerca del óptimo para la roya anaranjada.
Humedad relativa	Germinación Penetración	+	La sombra conserva el agua libre procedente de las lluvias en la plantación, lo cual es favorable para <i>Hemileia vastatrix</i> .
Viento	Dispersión	-	La sombra intercepta el viento y disminuye la dispersión en seco de las uredosporas de la roya.
Precipitación	Dispersión	+/-	La sombra intercepta las gotas de agua. Cuando la lluvia es poco abundante, el agua no llega al café y no se da la dispersión. Cuando las lluvias son abundantes (superior a 5 mm), la sombra canaliza el agua, forma gotas gordas con un impacto más fuerte sobre el café (depende de la altura de la sombra).
Rocío	Germinación Penetración	-	Bajo sombra no hay rocío, única fuente de agua libre en días sin lluvia.
Radiación	Germinación Penetración	+ -	La sombra intercepta la radiación y facilita la germinación. La sombra intercepta la radiación y disminuye la receptividad de las hojas del café.

(Pinoargote et al., 2016). Algo similar encontraron Cerda et al. (2016), lo cual se muestra en la Figura 1. Además, la producción incrementada de hojarasca permitió una acumulación más intensa de carbono en el suelo.

Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo: fertilidad, erosión, humedad

Conservar niveles altos de materia orgánica es uno de los beneficios principales de los árboles de sombra (Muschler, 1999), tanto por su rol de mantener la estructura del suelo como por su importancia como fuente de nutrientes (Guharay et al., 2000). El nivel de esta en el suelo depende de la composición botánica de las especies presentes, de la productividad primaria del ecosistema y del manejo.

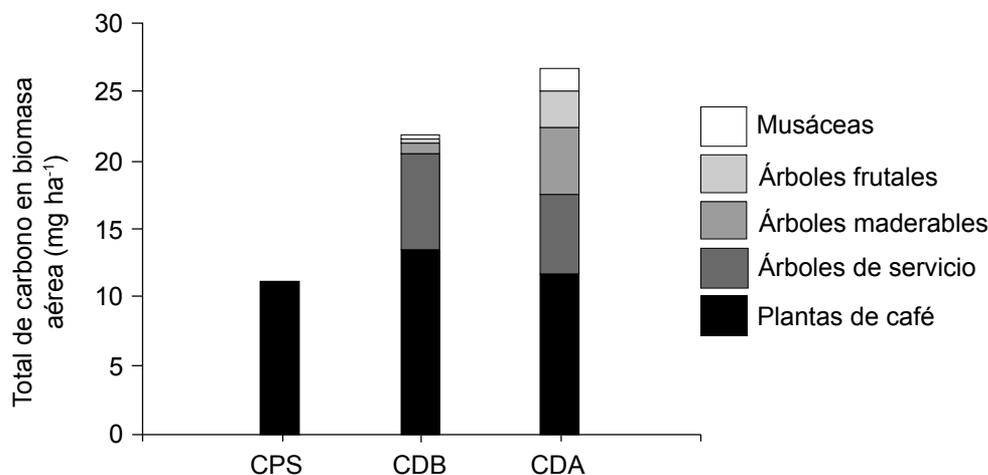


Figura 1. Efecto de los tipos de sombra sobre el total de carbono en biomasa aérea. CPS: café a pleno sol, CDB: sistema agroforestal de café con diversificación baja, CDA: sistema agroforestal de café con diversificación alta. Adaptado de Cerda et al. (2016).

Figura 1. Effects of the types of shade on the total aboveground biomass carbon. CPS: coffee in full sun, CDB: coffee agroforestry systems with low diversification, CDA: coffee agroforestry system with high diversification. Adapted from Cerda et al. (2016).

Cafetales sombreados con *Erythrina poeppigiana* y otras especies, conservan de manera significativa una mayor cantidad de hojarasca y ramas en el suelo, en comparación con aquellos que se producen a pleno sol (Villarreyana-Acuña, 2016b). Se observó una diferencia de 4 t de hojarasca por año entre cafetales sombreados (mayor cantidad) y sin sombra (Muschler, 1999). Además, el contenido de carbono en el suelo puede aumentar, conforme aumenta el nivel de sombra, así como su capacidad de retener nutrientes (capacidad de intercambio catiónico) (Muschler, 1999). Se ha observado mayor contenido de potasio (47 % más) y menos acidez del suelo (45 % menos) en cafetales con alta diversificación (diferentes especies de árboles y musáceas) versus sin árboles, independientemente del manejo que se haga en los sistemas (Cerda et al., 2016). Asimismo, se han evidenciado diferencias significativas con respecto al magnesio a favor de los sistemas agroforestales (72 a 82 % más que pleno sol) (Porrás-Vanegas, 2006).

La sombra contribuye a disminuir la evaporación diaria del agua del suelo, desde un 17 % (con sombra media) hasta un 45 % (con sombra densa), comparado con muy poca sombra o pleno sol (Lin, 2010). Eso se da posiblemente por la intercepción de la luz solar y el mantillo que se forma por la abundante hojarasca que cae de los árboles (Rapidel et al., 2015a). De esa manera, permite conservar la humedad por mayor tiempo, sobre todo en los primeros 30 cm, lo cual es beneficioso para el café, porque a esa profundidad se encuentra la mayor cantidad de raíces de este (Vis, 1986; Fassbender, 1987; Lin, 2007).

La humedad general del suelo bajo sombra en los primeros 120 cm de profundidad es similar a la humedad a pleno sol, sin embargo, a una profundidad mayor a los 120 cm se reduce bajo sombra (desde un 10 % hasta un 18 % en los 200 cm de profundidad) (Cannavo et al., 2011; Padovan et al., 2015). Esta reducción se explica por el consumo de agua de los árboles a través de sus raíces profundas, lo que puede variar con la especie de árbol utilizado (Siles et al., 2010; Padovan et al., 2015). Se ha comprobado que la transpiración total de la plantación es mayor en el sistema agroforestal (Rapidel et al., 2015a). En general, se puede decir que los árboles de sombra transpiran más agua de la que la sombra permite ahorrar, por menor transpiración del café o menor evaporación del suelo (van-Kanten y Vaast, 2006).

Con respecto a la erosión, en un estudio realizado en Costa Rica sobre la dinámica de la escorrentía y la pérdida de suelo en plantación de café con pendiente inclinada (suelo ultisol), se determinó que el café como cultivo perenne puede ayudar a reducir la escorrentía y los niveles de erosión de los suelos (Villatoro-Sánchez et al., 2015). La cobertura de suelo incluye hojas y ramas de los cafetos y de los árboles de sombra (producto de poda y defoliación natural) y malezas; esta también es beneficiosa para proteger el suelo de la erosión laminar (Blanco-Sepúlveda y Aguilar-Carrillo, 2015; Villatoro-Sánchez et al., 2015). Por lo tanto, se puede decir que los árboles de sombra son importantes para proteger el suelo de ese tipo de erosión y conservar su fertilidad, a través de la cantidad de materia orgánica (hojas y ramas) que aportan al sistema.

Se prevé que los árboles de sombra, por tener raíces profundas que cruzan los horizontes de deslizamiento, podrían ayudar a evitar la erosión por movimiento de masa (deslizamiento o deslave). En un estudio realizado en Nicaragua después del Huracán Mitch ocurrido en 1998, se hizo cierta alusión al respecto (Holt-Giménez, 2002), pero son necesarias más investigaciones sobre esta temática.

Los árboles de sombra favorecen la biología del suelo. El número de lombrices en el suelo es mayor bajo cafetales con árboles, principalmente manejados orgánicamente, en comparación con cafetales a pleno sol (Porras-Vanegas, 2006); ese resultado puede estar relacionado con la menor evaporación del agua en los sistemas agroforestales. Las lombrices de tierra (macrofauna) afectan en gran medida la estructura física del suelo, fomentan el crecimiento de las raíces, la ventilación del suelo y la remoción de la materia orgánica (Coyne, 1999). También se ha encontrado mayor número de actinomicetos en las parcelas de café con sombra que sin ella (Porras-Vanegas, 2006). En el estudio de Porras-Vanegas (2006) no se encontraron diferencias significativas en el número de hongos en el suelo en los sistemas de café; sin embargo, Staver et al. (2001) mencionaron que la luz solar directa en los cafetales reduce las poblaciones de *Beauveria bassiana* y *Lecanicilium lecanii*, hongos que se desarrollan de manera natural en el suelo y que son controladores biológicos de la broca del café y la roya, respectivamente.

Árboles de sombra y su efecto sobre el reciclaje de nutrientes

Entre los servicios ecosistémicos de los árboles en el cafetal, el reciclaje de nutrientes tiene un papel central; este beneficio puede favorecer a los sistemas agroforestales sobre otros usos de la tierra, siempre y cuando las interacciones positivas sean más fuertes que las negativas, por ejemplo, competencia por nutrientes y agua (Muschler, 1999). Se ha observado que suelos bajo café a pleno sol presentan una mineralización anaeróbica más lenta ($1,7 \text{ mg N kg}^{-1}$ de suelo) en comparación con cafetales con sombra de *Erythrina poeppigiana*, árbol fijador de nitrógeno ($5,64 \text{ mg N kg}^{-1}$ de suelo); asimismo, se ha encontrado que la mineralización aeróbica es igualmente superior en suelos de cafetales sombreados (Villarreyna-Acuña, 2016b).

Los árboles de sombra, por sus raíces profundas, favorecen el reciclaje de nutrientes. Se encontraron hasta 1570 kg ha^{-1} de nitrato acumulado en el subsuelo bajo café a profundidad entre 80-200 cm, y con lixiviaciones aún a profundidades mayores (hasta 380 cm) (Harmand et al., 2010); según estos autores, el nitrato acumulado en el subsuelo podría ser aprovechado en el sistema agroforestal (a través de árboles con raíces profundas) y ponerse a disponibilidad del cultivo a través de la materia orgánica (hojarasca) que los árboles regresan al suelo. En estudios anteriores se observó que los árboles de sombra pueden ofrecer la posibilidad de reciclar nutrientes profundos fuera del alcance del cultivo, para ser aprovechados de manera superficial evitando su lixiviación (Lundgren, 1979; Cannell et al., 1996). Además, se estima que el reciclaje del fósforo por los árboles de sombra es bajo (Palm, 1995), por lo que, podría existir competencia entre especies por este elemento.

El beneficio de los árboles fijadores de nitrógeno para el suelo

El uso de árboles de servicio fijadores de nitrógeno es una práctica muy usual en plantaciones de café moderadamente intensivas de América Latina. La diversidad específica en estos sistemas es reducida a dos o tres especies, incluyendo el cultivo principal. Las especies de sombra más frecuentes son *Erythrina* spp. (*poeppigiana*, *fusca*, *berteroana*), *Inga* spp. (*oerstediana*, *edulis*, *punctata*, *laurina*, *vera*, *jinicuil*, *densiflora*), y en menor grado, *Gliricidia sepium* y *Grevillea robusta*. Son especies que por lo general fijan nitrógeno (con la excepción de *G. robusta*), tienen rápido crecimiento (entre tres y cinco años) y resisten podas una o varias veces al año; algunas producen leña de buena o regular calidad, otras frutas (*Inga edulis*) y otras no producen nada (*Erythrina poeppigiana*). Se multiplican fácilmente, con estacas (*Erythrina* spp.) o semillas (*Inga* spp.) (Rapidel et al., 2015a).

La presencia de especies fijadoras de nitrógeno atmosférico en el sistema agroforestal permite mejorar el balance en este elemento. Las cantidades estimadas de nitrógeno en cafetales bajo condiciones normales, con manejo de especies fijadoras como *Erythrina poeppigiana* o *Inga edulis*, rondan los 100 kg ha⁻¹ (Leblanc et al., 2007), lo que puede variar desde 56-555 kg ha⁻¹ (Nygren et al., 2012). La producción de café depende en gran medida de los aportes de nitrógeno, que representan un gasto muy importante en las plantaciones (Meylan et al., 2013). Por lo tanto, los servicios que aportan los árboles fijadores de nitrógeno son principalmente dirigidos a la producción de café.

Se ha manejado el concepto de que la presencia de árboles de servicio le confiere al sistema una mayor resiliencia ecológica y económica. En la parte ecológica, actúan como amortiguadores de los cambios en el ambiente, por ejemplo, la última crisis de la roya mostró tendencia hacia una mayor resiliencia ecológica en los cafetales bajo sombra (Avelino et al., 2015). Mientras en la parte económica, colaboran con una menor dependencia a las variaciones de los precios, tanto de café como de insumos (fertilizantes sintéticos) (Herzog, 1994).

Análisis de las relaciones entre servicios ecosistémicos para un mejor diseño de cafetales con sombra

Para un mejor diseño de cafetales, el conocimiento de los efectos de la sombra sobre los servicios ecosistémicos debe reforzarse con análisis de relaciones entre las prestaciones de mayor interés. Para tal fin, se deben cuantificar indicadores de servicios ecosistémicos, y luego hacer análisis de relaciones (regresiones) entre pares de indicadores, cuyos resultados podrían denotar compromisos (trade-offs), sinergias o simplemente ninguna relación; a partir de esos resultados se pueden identificar las mejores prácticas o modificar decisiones para evitar compromisos (Rapidel et al., 2015b). El mismo análisis permite identificar los sistemas más exitosos, es decir, aquellos que pueden alcanzar valores deseables de ambos indicadores y, por tanto, hasta podrían servir de modelos para guiar otros sistemas a los mismos resultados.

Estudios recientes en cafetales a pleno sol y bajo sombra en Turrialba, Costa Rica, mediante el análisis de relaciones entre servicios ecosistémicos, permitieron identificar los sistemas más promisorios. Se cuantificaron indicadores de servicios de aprovisionamiento (producción de café, frutas y otros bienes) y de regulación (mantenimiento de fertilidad de suelos, plagas y enfermedades, secuestro de carbono), y luego se hicieron análisis de relaciones entre varias combinaciones de indicadores. Un primer estudio permitió demostrar que los sistemas agroforestales de café, tanto con sombra simple y con sombra diversificada, son promisorios para proveer varios servicios simultáneamente, mientras que la mayoría de los cafetales a pleno sol solo pueden ofrecer la provisión de granos de café (Cerdeira et al., 2016). Otro estudio, a través del análisis de 48 combinaciones entre indicadores de servicios, permitió identificar seis tipos de sistemas agroforestales de café específicos (desde cafetales con sombra simple hasta sombra diversificada), capaces de proveer los niveles de interés de indicadores de servicios como altos rendimientos del cultivo principal (superior a 20 quintales oro ha⁻¹), pérdidas mínimas de rendimiento, nivel de enfermedades por debajo del umbral de daño económico, suelos fértiles y secuestro de carbono. Los autores

concluyeron que ese tipo de hallazgos es importante para la caficultura de la zona, porque los seis sistemas en ese caso representaron varias opciones (modelos) para ofrecer y guiar a otros productores a conseguir los servicios de su mayor interés (Cerdeira, 2017). En esos estudios particulares para Turrialba, en la mayoría de los análisis no se encontraron relaciones significativas entre indicadores de servicios ecosistémicos, lo cual podría cambiar en otros lugares. Por tanto, similares estudios deberían hacerse en otras zonas y regiones para analizar relaciones entre servicios e identificar los sistemas más promisorios de acuerdo con las condiciones biofísicas locales y objetivos del productor, lo que significa que no se puede hablar de mejores especies, mejores arreglos o tener una receta de diseño y manejo, porque hay que tomar en cuenta muchos factores.

Conclusiones

Según la revisión realizada es evidente que los árboles de sombra prestan importantes servicios ecosistémicos de aprovisionamiento y regulación en relación con el cultivo del café. Los efectos positivos de estos sobre tales servicios son mayores que los efectos negativos que podrían ocasionar. Reducción de la bienalidad de los cafetos a través de la regulación de la carga fructífera, productos adicionales (frutos, madera, leña), una producción más sostenible a largo plazo, secuestro de carbono, regulación del microclima, regulación de la fertilidad del suelo, reciclaje de nutrientes y reducción de la evaporación del agua del suelo son algunos de los efectos positivos más destacados sobre ambos servicios. Los efectos negativos están relacionados con el hecho de favorecer a ciertas plagas y patógenos, y ocasionar una ligera disminución en el rendimiento. Sin embargo, esos efectos no son atribuibles solo a la sombra, sino también a su diseño y manejo, es decir, se podrían evitar o mitigar con una selección correcta de los árboles para el sistema de acuerdo con las condiciones locales (densidades de plantación y composición botánica), y haciendo un manejo adecuado de la cobertura de sombra (podas para evitar excesiva sombra, por ejemplo).

El conocimiento de compromisos entre servicios puede ayudar en la toma de decisiones para el manejo de agroecosistemas, asimismo, los sistemas promisorios que se identifiquen pueden servir de modelos para diferentes tipos de productores. Este enfoque de analizar relaciones entre servicios para un mejor diseño es reciente, y puede ser aplicado tanto para cafetales como para otros sistemas de producción.

Literatura citada

- Allinne, C., S. Savary, and J. Avelino. 2016. Delicate balance between pest and disease injuries, yield performance, and other ecosystem services in the complex coffee-based systems of Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 222:1-12. doi:10.1016/j.agee.2016.02.001
- Angrand, J., P. Vaast, J. Beer, y T. Benjamin. 2004. Comportamiento vegetativo y productivo de *Coffea arabica* a pleno sol y en tres sistemas agroforestales en condiciones subóptimas en Costa Rica. *Agroforestería Américas* 41-42:77-82.
- Ambrecht, I., and M.C. Gallego. 2007. Testing ant predation on the coffee berry borer in shaded and sun coffee plantations in Colombia. *Entomol. Exp. Appl.* 124:261-267. doi:10.1111/j.1570-7458.2007.00574.x
- Avelino, J., G.M. Ten-Hoopen, and F. DeClerck. 2011. Ecological mechanisms for pest and disease control in coffee and cacao agroecosystems of the Neotropics. In: B. Rapidel et al., editors, *Ecosystem services from agriculture and agroforestry: measurement and payment*. Earthscan Publications, London, GBR. p. 91-117.
- Avelino, J., y G. Rivas. 2013. La roya anaranjada del cafeto. HAL archives-ouvertes, FRA. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036/document> (consultado 20 ago. 2017).

- Avelino, J., M. Cristancho, S. Georgiou, P. Imbach, L. Aguilar, G. Bornemann, P. Läderach, F. Anzueto, A. Hruska, and C. Morales. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec.* 7:303-321. doi:10.1007/s12571-015-0446-9
- Balvanera, P., H. Cotler, O. Aburto-Oropeza, A. Aguilar-Contreras, M. Aguilera-Peña, M. Aluja, A. Andrade-Cetto, I. Arroyo-Quiroz, L. Ashworth, M. Astier, P. Ávila, D. Bitrán-Bitrán, T. Camargo, J. Campo, B. Cárdenas-González, A. Casas, F. Díaz-Fleischer, J.D. Etchevers, A. Ghillardi, E. González-Padilla, A. Guevara, E. Lazos, C. López-Sagástegui, R. López-Sagástegui, J. Martínez, O. Maser, M. Mazari, A. Nadal, D. Pérez-Salicrup, R. Pérez-Gil-Salcido, M. Quesada, J. Ramos-Elorduy, A. Robles-González, H. Rodríguez, J. Rull, G. Suzán, C.H. Vergara, S. Xolalpa-Molina, L. Zambrano, y A. Zarco. 2009. Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. En: B. de-Jong et al., editores, *Capital natural de México*, Vol. II. Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, Mexico D.F., MEX. p. 185-245.
- Beer, J., R. Muschler, D. Kass, and E. Somarriba. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agrofor. Syst.* 38:139-164. doi:10.1023/A:1005956528316
- Blanco-Sepúlveda, R., and A. Aguilar-Carrillo. 2015. Soil erosion and erosion thresholds in an agroforestry system of coffee (*Coffea arabica*) and mixed shade trees (*Inga* spp and *Musa* spp) in Northern Nicaragua. *Agric. Ecosyst. Environ.* 210:25-35. doi:10.1016/j.agee.2015.04.032
- Bunn, C., P. Läderach, O. Ovalle-Rivera, and D. Kirschke. 2015. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Clim. Change* 129:89-101. doi:10.1007/s10584-014-1306-x
- Campanha, M., R. Santos, G. de-Freitas, H. Martinez, S. Garcia, and F. Finger. 2005. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *Agrofor. Syst.* 63:75-82. doi:10.1023/B:AGFO.0000049435.22512.2d.
- Cannavo, P., J. Sansoulet, J.M. Harmand, P. Siles, E. Dreyer, and P. Vaast. 2011. Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140:1-13. doi:10.1016/j.agee.2010.11.005.
- Cannell, M.G.R., M. Van-Noordwijk, and C.K. Ong. 1996. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agrofor. Syst.* 34:27-31. doi:10.1007/BF00129630
- Cerda, R. 2017. Assessment of yield and economic losses caused by pests and diseases in a range of management strategies and production situations in coffee agroecosystems. Dr. Thesis, UMR SYSTEM, Montpellier SupAgro, Montpellier, FRA.
- Cerda, R., C. Allinne, C. Gary, P. Tixier, C.A. Harvey, L. Krolczyk, C. Mathiot, E. Clément, J.N. Aubertot, and J. Avelino. 2016. Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee. *Eur. J. Agron.* 82:308-319. doi:10.1016/j.eja.2016.09.019
- Cerda R, J. Avelino, C. Gary, P. Tixier, E. Lechevallier, and C. Allinne. 2017. Primary and secondary yield losses caused by pests and diseases: Assessment and modeling in coffee. *PLoS ONE* 12(1):e0169133. doi:10.1371/journal.pone.0169133
- Cerdán, C.R., M.C. Rebolledo, G. Soto, B. Rapidel, and F.L. Sinclair. 2012. Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agric. Syst.* 110:119-130. doi:10.1016/j.jagsy.2012.03.014
- Coyne, M. 1999. *Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio*. Paran, Madrid, ESP.
- DaMatta, F.M. 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Res.* 86:99-114. doi:10.1016/j.fcr.2003.09.001
- DaMatta, F., y N. Rodríguez. 2007. Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotrópico: una visión agronómica y ecofisiológica. *Agron. Colomb.* 25:113-123.

- Damon, A. 2000. A review of the biology and control of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). Chiapas, México. Bull. Entomol. Res. 90:453-465. doi:10.1017/S0007485300000584
- Dehevels, O., G.X. Rousseau, G. Soto-Quiroga, M. Decker-Franco, R. Cerda, S.J. Vílchez-Mendoza, and E. Somarriba. 2014. Biodiversity is affected by changes in management intensity of cocoa-based agroforests. Agrofor. Syst. 88:1081-1099. doi:10.1007/s10457-014-9710-9
- Estivariz, C.J. 1997. Efecto de sombra sobre floración y producción de *Coffea arabica* var. Caturra, después de una poda completa en Turrialba, Costa Rica. Tesis MSc., CATIE, Turrialba, CRI.
- Fassbender, H.W. 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Serie Materiales de enseñanza No 29. CATIE, Turrialba, CRI.
- Granados-Montero, M. 2015. Estudio de la epidemiología y alternativas de manejo agroecológico del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en cafeto bajo sistemas agroforestales en Costa Rica. Tesis Ph.D., Universidad de Costa Rica, San José, CRI.
- Guharay, F., J. Monterrey, D. Monterroso, y C. Staver. 2000. Manejo integrado de plagas en el cultivo del café. Manual Técnico N° 44. CATIE, Managua, NCA.
- Guyot, B., D. Gueule, J.C. Manez, J.J. Perriot, J. Giron, et L. Villain. 1996. Influence de l'altitude et de l'ombrage sur la qualité des cafés Arabica. Plantations, Recherche, Développement 3(4):273-283.
- Harmand, J.M., H. Ávila, R. Oliver, L. Saint-André, and E. Dambrine. 2010. The impact of kaolinite and oxi-hydroxides on nitrate adsorption in deep layers of a Costarican Acrisol under coffee cultivation. Geoderma 158:216-224. doi:10.1016/j.geoderma.2010.04.032
- Harmand, J.M., K. Hergoualc'h, S. De-Miguel-Magaña, B. Dzib, P. Siles, and P. Vaast. 2006. Carbon sequestration in coffee agroforestry plantations of Central America. In: ASIC, editor, 21st International Conference on Coffee Science. CIRAD, Montpellier, FRA. p. 1071-1074.
- Herzog, F. 1994. Multipurpose shade trees in coffee and cocoa plantations in Côte d'Ivoire. Agrofor. Syst. 27:259-267. doi:10.1007/BF00705060
- Holt-Giménez, E. 2002. Measuring farmers' agroecological resistance after hurricane Mitch in Nicaragua: a case study in participatory, sustainable land management impact monitoring. Agric. Ecosyst. Environ. 93:87-105. doi:10.1016/S0167-8809(02)00006-3
- Houghton, J. 2006. Global warming: The complete briefing. 3rd ed. Cambridge University Press, GBR.
- IICA, editor. 1988. Curso regional sobre nutrición mineral del café. 7-18 nov. IICA/CATIE, San José, CRI.
- Jackson, L., M. van-Noordwijk, J. Bengtsson, W. Foster, L. Lipper, M. Pulleman, M. Said, J. Snaddon, and R. Vodouhe. 2010. Biodiversity and agricultural sustainability: from assessment to adaptive management. Curr. Opin. Environ. Sustain. 2:80-87. doi:10.1016/j.cosust.2010.02.007
- Jha, S., C.M. Bacon, S.M. Philpott, V. E. Méndez, P. Läderach, and R.A. Rice. 2014. Shade coffee: update on a disappearing refuge for biodiversity. BioScience 64:416-428. doi:10.1093/biosci/biu038
- Jose, S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. Agrofor. Syst. 76:1-10. doi:10.1007/s10457-009-9229-7.
- Kellermann, J.L., M.D. Johnson, A.M. Stercho, and S.C. Hackett. 2008. Ecological and economic services provided by birds on Jamaican Blue Mountain coffee farms. Conserv. Biol. 22:1177-1185. doi:10.1111/j.1523-1739.2008.00968.x
- Leblanc, H.A., R.L. McGraw, and P. Nygren. 2007. Dinitrogen-fixation by three neotropical agroforestry tree species under semi-controlled field conditions. Plant Soil. 291:199-209. doi:10.1007/s11104-006-9186-0

- Lin, B.B. 2007. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agric For. Meteorol.* 144:85-94. doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.009.
- Lin, B.B. 2010. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agric. For. Meteorol.* 150:510-518. doi:10.1016/j.agrformet.2009.11.010
- López-Bravo, D.F., E.M. Virginio-Filho, and J. Avelino. 2012. Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Prot.* 38:21-29. doi:10.1016/j.cropro.2012.03.011
- Lundgren, B. 1979. Research strategy for soils in agroforestry. In: H.O. Mongi, and P.A. Huxley, editors, *Soils research in agroforestry. Research methods and strategy: Standardization.* ICRAF, Nairobi, KEN. p. 523-538.
- Malézieux, E. 2012. Designing cropping systems from nature. *Agron. Sustain. Dev.* 32:15-29. doi:10.1007/s13593-011-0027-z
- Martínez-Salinas, A., F. DeClerck, K. Vierling, L. Vierling, L. Legal, S. Vílchez-Mendoza, and J. Avelino. 2016. Bird functional diversity supports pest control services in a Costa Rican coffee farm. *Agric. Ecosyst. Environ.* 235:277-288. doi:10.1016/j.agee.2016.10.029
- Méndez, V.E., C.M. Bacon, M. Olson, K.S. Morris, and A. Shattuck. 2010. Agrobiodiversity and shade coffee smallholder livelihoods: A review and synthesis of ten years of research in Central America. *Professional Geographer* 62:357-376. doi: 10.1080/00330124.2010.483638
- Meylan, L., A. Merot, C. Gary, and B. Rapidel. 2013. Combining a typology and a conceptual model of cropping system to explore the diversity of relationships between ecosystem services: The case of erosion control in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. *Agric. Syst.* 118:52-64. doi:10.1016/j.agry.2013.02.002
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis.* Island Press, WA, USA.
- Moraga-Quezada, P., R.I. Bolaños-Taleno, M. Pilz, R. Munguía-Hernández, H.A. Jürgen-Pohlen, M. Barrios, J. Hagggar, y W. Gamboa-Moya. 2011. Árboles de sombra e intensidad del cultivo afectan el rendimiento de café (*Coffea arabica* L.) y la valoración ecológica en Masatepe, Nicaragua. *La Calera* 11(17):41-47. doi:10.5377/calera.v11i17.776
- Mouen-Bedimo, J.A., I. Njiayouom, D. Bieysse, M. Ndoumbè-Nkeng, C. Cilas, and J.L. Nottéghem. 2008. Effect of shade on Arabica coffee berry disease development: Toward an agroforestry system to reduce disease impact. *Phytopathology* 98:1320-1325. doi:10.1094/PHYTO-98-12-1320.
- Muschler, R.G. 1997a. Efectos de sombra de *Erythrina poeppigiana* sobre *Coffea arabica* vars. Caturra y Catimor. En: J. Echeverri, y L. Zamora, editores, *Memorias del XVIII Simposium Latinoamericano de Caficultura.* IICA, San José, CRI. p. 157-162.
- Muschler, R.G. 1997b. Shade or sun for ecologically sustainable coffee production: a summary of environmental key factors. En: CATIE, editor, *III Semana Científica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.* CATIE, Turrialba, CRI. p. 109-112.
- Muschler, R.G. 1999. *Árboles en cafetales.* CATIE, Turrialba, CRI.
- TEEB (The Economics of Ecosystems & Biodiversity). 2015. *TEEB for agriculture & food.* TEEB, Geneva SUI. http://img.teebweb.org/wp-content/uploads/2016/01/TEEBAgFood_Interim_Report_2015_web.pdf (accessed Aug. 20, 2017).
- Nygren, P., M.P. Fernández, J.M. Harmand, and H.A. Leblanc. 2012. Symbiotic dinitrogen fixation by trees: an underestimated resource in agroforestry systems? *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 94:123-160. doi:10.1007/s10705-012-9542-9
- Padovan, M.P., V.J. Cortez, L.F. Navarrete, E.D. Navarrete, A.C. Deffner, L.G. Centeno, R. Munguía, M. Barrios, J.S. Vílchez-Mendoza, C. Vega-Jarquín, A.N. Costa, R.M. Brook, and B. Rapidel. 2015. Root distribution and water use in coffee shaded with *Tabebuia rosea* bertol. and *Simarouba glauca* dc. Compared to full sun coffee in sub-optimal environmental conditions. *Agrofor. Syst.* 89:857-868. doi:10.1007/s10457-015-9820-z

- Palm, C.A. 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. *Agrofor. Syst.* 30:105-124. doi:10.1007/BF00708916
- Perfecto, I., J. Vandermeer, A. Mas, and L. Soto-Pinto. 2005. Biodiversity yield, and shade coffee certification. *Ecol. Econ.* 54:435-446. doi:10.1016/j.ecolecon.2004.10.009
- Pico-Rosado, J.T. 2014. Efecto de la sombra del café y el manejo sobre la incidencia, severidad, cantidad de inóculo y dispersión de *Hemileia vastatrix* en Turrialba, Costa Rica. Tesis M.Sc., CATIE, Turrialba, CRI.
- Pinoargote, M., R. Cerda, L. Mercado, A. Aguilar, M. Barrios, and E. Somarriba. 2016. Carbon stocks, net cash flow and family benefits from four small coffee plantation types in Nicaragua. *For. Trees Livelihoods* 26:183-198. doi:10.1080/14728028.2016.1268544
- Porras-Vanegas, C.M. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica. Tesis M.Sc., CATIE, Turrialba, CRI.
- Rapidel, B., C. Allinne, C. Cerdán, L. Meylan, E.d.M. Virginio-Filho, y J. Avelino. 2015a. Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales. En: F. Montagnini et al., editores, *Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. Serie técnica. Informe técnico No. 42. CATIE, Turrialba, CRI. p. 5-20.
- Rapidel, B., A. Ripoché, C. Allinne, A. Metay, O. Deheuvels, N. Lamanda, J.M. Blazy, H. Valdés-Gómez, and C. Gary. 2015b. Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agron. Sustain. Dev.* 35:1373-1390. doi:10.1007/s13593-015-0317-y
- Salazar, L.F., y E. Hincapié. 2007. Las arvenses y su manejo en los cafetales. Capítulo 5. En: J. Arcila et al., editores, *Sistemas de producción de café en Colombia*. Cenicafé, Chinchiná, COL. p. 101-130.
- Samper, M. 1999. Trayectoria y viabilidad de las caficulturas centroamericanas. En: B. Bertrand, y B. Rapidel, editores. *Desafíos de la caficultura en Centroamérica*. IICA, y CIRAD, San José, CRI. p. 1-68.
- SCBD (Secretariat of the Convention on Biological Diversity). 2009. Connecting biodiversity and climate change: report of the second Ad Hoc technical expert group on biodiversity and climate change. Technical Series No. 41. CBD, and UNEP, Montreal, CAN.
- Siles, P., J.M. Harmand, and P. Vaast. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agrofor. Syst.* 78:269-286. doi:10.1007/s10457-009-9241-y
- Solórzano-Lanzas, J., y F. Cáceres-Trujillo. 2012. Programa de mejoramiento productivo de la caficultura para pequeños y medianos productores. Serie de estudios especiales No. 15. FUNIDES, San José, CRI.
- Somarriba, E., R. Cerda, L. Orozco, M. Cifuentes, H. Dávila, T. Espin, H. Mavisoy, G. Ávila, E. Alvarado, V. Poveda, C. Astorga, E. Say, and O. Deheuvels. 2013. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agric. Ecosyst. Environ.* 173:46-57. doi:10.1016/j.agee.2013.04.013
- Sosa-López, M., y M. Ordoñez. 2001. Uso y manejo de sombra en los cafetales. En: IHCAFE (Instituto Hondureño del Café), editor, *Manual de caficultura*. 3ª ed. Tegucigalpa, HON. p. 78-86.
- Soto-Pinto, L., I. Perfecto, J. Castillo-Hernandez, and J. Caballero-Nieto. 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.* 80:61-69. doi:10.1016/S0167-8809(00)00134-1
- Staver, C., F. Guharay, D. Monterroso, and R.G. Muschler. 2001. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agrofor. Syst.* 53:151-170. doi:10.1023/A:1013372403359.

- Thériez, M. 2015. Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica. CATIE, Turrialba, CRI.
- Van-Kanten, R., and P. Vaast. 2006. Transpiration of Arabica coffee and associated shade tree species in sub-optimal, low-altitude conditions of Costa Rica. *Agrofor. Syst.* 67:187-202. doi:10.1007/s10457-005-3744-y
- Véliz-Chávez, P.C., E. González-Sosa, S.S. Barajas-Ortiz, y N.M. Ramos-Salinas. 2012. El efecto pantalla o sombra de los árboles en la formación de los escurrimientos urbanos. *Tecnol. Cienc. Agua* 3(4):73-87.
- Vignola, R., C.A. Harvey, P. Bautista-Solis, J. Avelino, B. Rapidel, C. Donatti, and R. Martinez. 2015. Ecosystem-based adaptation for smallholder farmers: Definitions, opportunities and constraints. *Agric. Ecosyst. Environ.* 211:126-132. doi:10.1016/j.agee.2015.05.013.
- Villarreyna-Acuña, R.A. 2016a. Efecto de la sombra sobre las plagas y enfermedades, a través del microclima, fenología y estado fisiológico del cafeto. CATIE, Turrialba, CRI.
- Villarreyna-Acuña, R.A. 2016b. Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo, en sistemas agroforestales con café, incluyendo la fenología y fisiología de los cafetos. CATIE, Turrialba, CRI.
- Villatoro-Sánchez, M., Y. Le-Bissonnais, R. Moussa, and B. Rapidel. 2015. Temporal dynamics of runoff and soil loss on a plot scale under a coffee plantation on steep soil (Ultisol), Costa Rica. *J. Hydrol.* 523:409-426. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.058
- Vis, M. 1986. Interception, drop size distributions and rainfall kinetic energy in four Colombian forest ecosystems. *Earth Surf. Proc. Landforms* 11:591-603. doi:10.1002/esp.3290110603
- Wang, N., L. Jassogneb, P.J.A. van-Asten, D. Mukasa, I. Wanyama, G. Kagezi, and K.E. Giller. 2015. Evaluating coffee yield gaps and important biotic, abiotic, and management factors limiting coffee production in Uganda. *Eur. J. Agron.* 63:1-11. doi:10.1016/j.eja.2014.11.003
- Zuidema, P.A., P.A. Leffelaar, W. Gerritsma, L. Mommer, and N.P.R. Anten. 2005. A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agric. Syst.* 84:195-225. doi:10.1016/j.agry.2004.06.015