

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/353779752>

# Aportes a la investigación, fortalecimiento de capacidades y formulación de políticas para el sector cafetalero en 20 años de ensayos de sistemas agroforestales con café

Article · August 2021

CITATIONS

0

READS

165

35 authors, including:



**Elias De Melo Virginio Filho**

CATIE - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

118 PUBLICATIONS 962 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Rolando H. Cerda**

CATIE - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

55 PUBLICATIONS 1,044 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Fernando Casanoves**

CATIE - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

364 PUBLICATIONS 11,245 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Jacques Avelino**

Cirad - La recherche agronomique pour le développement

129 PUBLICATIONS 3,305 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Structural features of biochar as a cause for improvements in soil water availability in a loamy sand soil. [View project](#)

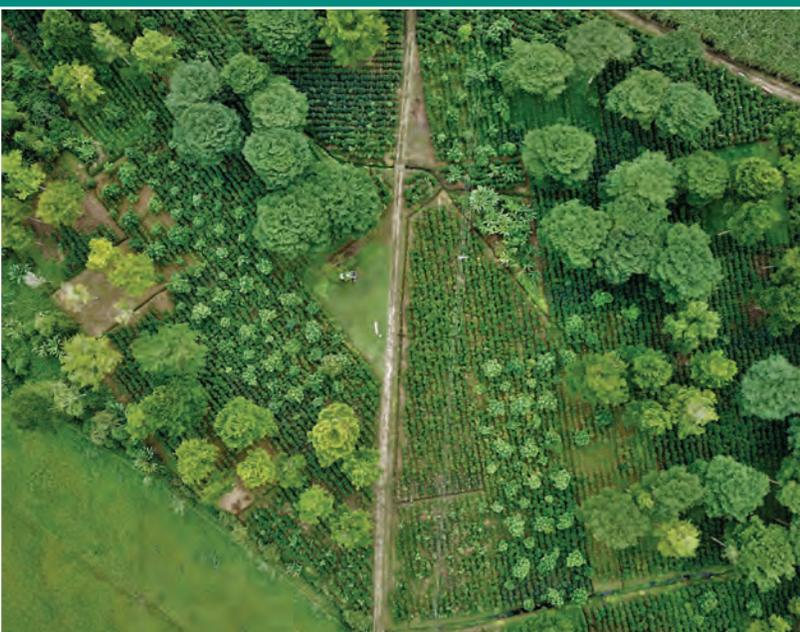


WCR Shade, Fertilization and Coffee Leaf Rust [View project](#)

# Agroforestería en las Américas

Nº51 2021

[www.catie.ac.cr/revistas/](http://www.catie.ac.cr/revistas/)



Resultados del Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roca del Café -PROCAGICA



CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

## Comité Editorial

**Eduardo Somarriba Chavez**

**Elias de Melo Virginio Filho**

**Rolando Cerda**

## Correspondencia

Agroforestería en las Américas  
CATIE  
Cartago, Turrialba 30501  
Costa Rica  
Tel.: (506)2558-2408  
Fax: (506)2558-2045  
Correo electrónico: [agrofor@catie.ac.cr](mailto:agrofor@catie.ac.cr)  
Internet://[www.catie.ac.cr/revistas/](http://www.catie.ac.cr/revistas/)

No. 51, 2021

Agroforestería en las Américas no asume la responsabilidad por las opiniones y afirmaciones expresadas por los autores en sus páginas. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de la institución.

Se autoriza la reproducción parcial o total de la información contenida en esta revista siempre y cuando se cite la fuente.

Este proyecto, coordinado a nivel regional por IICA, contó con el financiamiento de la Unión Europea.



Unión Europea



## Créditos

### Dirección técnica:

Elias de Melo Virginio Filho

### Revisores técnicos:

Rolando Cerda, Fernando Casanoves, Felipe Peguero

### Revisores técnicos invitados:

Oriana Valle, Mirna Barrios., Elena Florian

### Coordinación:

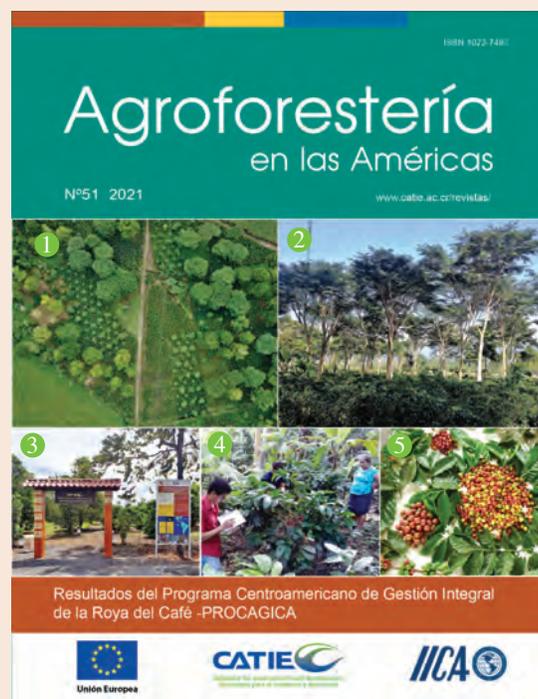
Mariela E. Leandro Muñoz

### Fotografías:

Portada: Milton Martinez (foto 1); Francisco Navarrete (foto 4); Elias de Melo (foto 2); Carlos Cordero (foto 3 y 5)

### Corrección de estilo: Lorena Orozco

**Diagramación:** Silvia Francis, Tecnología de Información y Comunicación, CATIE



### Título:

Agroforestería y la producción de café en el contexto alternativas a la crisis climática  
RESULTADOS DEL PROYECTO CATIE-PROCAGICA-IICA-UE:  
“Gestión integral de la roya del café en América Central y Caribe”

**Reseñas de resultados del proyecto****Aportes a la investigación, fortalecimiento de capacidades y formulación de políticas para el sector cafetalero en 20 años de ensayos de sistemas agroforestales con café**

**Elias de Melo Virginio Filho<sup>1</sup>, Eduardo Somarriba<sup>2</sup>, Rolando Cerda<sup>2</sup>, Fernando Casanoves<sup>2</sup>, Carlos Cordero<sup>2</sup>, Jacques Avelino<sup>3</sup>, Olivier Roupsard<sup>4</sup>, Bruno Rapidel<sup>4</sup>, Philippe Vaast<sup>5</sup>, Jean Michel Harmand<sup>4</sup>, Charles Staver<sup>6</sup>, John Beer<sup>7</sup>, Argenis Mora<sup>8</sup>, Víctor Hugo Morales<sup>8</sup>, Carlos Fonseca<sup>9</sup>, Víctor Vargas<sup>9</sup>, Luis Guillermo Ramírez<sup>7</sup>, Gabriela Soto<sup>10</sup>, Marney Isaac<sup>11</sup>, Lolita Durán Umaña<sup>10</sup>, Ana Tapia Fernández<sup>10</sup>, Luis Fernando Romero<sup>2</sup>, René León Gómez<sup>12</sup>, Harold Gamboa<sup>13</sup>, Pedro Diniz<sup>14</sup>, Osvaldo Viu Serrano Junior<sup>14</sup>, Leila Pires Bezerra<sup>15</sup>, Zigomar Menezes de Souza<sup>15</sup>, Carlos Caicedo<sup>16</sup>, Jimmy Pico<sup>16</sup>, Florencia Montagnini<sup>17</sup>, Jeremy Haggart<sup>18</sup>**

**RESUMEN**

A finales de los años 1990 el CATIE, con apoyo de varias instituciones, inició una red de ensayos de largo plazo en sistemas agroforestales con café. Los vacíos de información sobre las interacciones agroecológicas en sistemas con diferentes enfoques de producción a largo plazo, sumados a la urgente necesidad de asegurar sostenibilidad y restauración ecológica, fueron las principales motivaciones. Se presenta una reseña general de los primeros 20 años de estudios continuos en el CATIE, Turrialba, Costa Rica, a partir de un proceso interinstitucional e interdisciplinario. La idea base era generar conocimientos sobre las complejas interacciones entre clima, suelo, sombra, niveles y tipos de insumos y variedades de café que posibilitara el desarrollo de estrategias de diseño y manejo de sistemas agroforestales con potencial de sostener niveles de productividad aceptables y, a la vez, garantizar sinergismos ecológicos para la mejora del suelo, la biodiversidad y los servicios ambientales. El ensayo fue diseñado con seis tipos de sombra con la especie de servicio *Erythrina poeppigiana* y los maderables *Terminalia amazonia* (no fijador de nitrógeno) y *Chloroleucon eurycyclum* (fijador de nitrógeno), solos y en combinación, en contraste con el testigo a pleno sol. Como sub-tratamientos se definieron dos tipos de manejo (orgánico y convencional) en cuatro niveles: alto convencional (AC), moderado convencional (MC), orgánico intensivo (MO) y bajo orgánico (BO). La variedad principal de estudio fue la Caturra; además, se establecieron en algunos sistemas microparcels con Costa Rica 95 y los híbridos

Centroamericano y Milenio, L2A11, L3A17, L3A12 y L3A15. Luego de superar la fase crítica de establecimiento (primeros dos años), la plataforma de investigación se consolidó generando una invaluable base de datos y estudios a lo largo del tiempo. Con la colaboración de 22 universidades e instituciones de diversas partes del mundo, se desarrollaron 41 tesis de grado y posgrado, 23 artículos científicos en revistas internacionales y 22 documentos técnicos para diferentes públicos. Los resultados, usando una síntesis matricial sobre los estudios de los sistemas evaluados, indican elementos claves sobre las interacciones agroecológicas y sus vínculos con la sostenibilidad productiva y sinergias ecológicas. Los sistemas de producción con la variedad Caturra a pleno sol y/o con dos podas drásticas anuales de los árboles de sombra (bajo aporte de biomasa y mucha entrada de luz) con manejos AC y MC, aun con altos niveles de productividad, impactaron negativamente en variables biofísicas y en servicios ambientales. Los SAF con *Terminalia* y Caturra con manejo BO perdieron viabilidad en los primeros 10 años. Los SAF, en su conjunto, mejoraron el microclima. En particular los SAF con presencia de *Erythrina* mejoraron el desempeño productivo y los servicios ambientales. Todos los SAF presentaron mejor valoración de servicios ambientales que los sistemas a pleno sol. Los SAF que se destacaron en productividad y servicios ambientales fueron *Erythrina* en manejo MO y MC. Los sistemas *Erythrina* y *Erythrina* más *Chloroleucon*, ambos en manejo BO, han presentado buena rentabilidad, con bajos costos y buena valoración en servicios ambientales. Respecto a la

1 CATIE-PROCAGICA-IICA-UE, Costa Rica; eliasdem@catie.ac.cr  
 2 CATIE- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica  
 3 CIRAD-Centro de cooperación internacional en investigación agronómica para el desarrollo/CATIE, Costa Rica  
 4 CIRAD-Centro de cooperación internacional en investigación agronómica para el desarrollo, Francia  
 5 CIRAD-Centro de cooperación internacional en investigación agronómica para el desarrollo, Italia  
 6 Consultor, EUA  
 7 Consultor, Costa Rica  
 8 EARTH- Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda, Costa Rica

9 ICAFE-Instituto del Café, Costa Rica  
 10 UCR-Universidad de Costa Rica, Costa Rica  
 11 University of Toronto, Canadá  
 12 PROMECAFE, Guatemala  
 13 PROCAGICA-IICA, Costa Rica  
 14 Fazenda da Toca, Brasil  
 15 UNICAMP-Universidad Estatal de Campinas, Brasil  
 16 INIAP-Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Ecuador  
 17 Universidad Yale, EUA  
 18 Universidad de Greenwich, Inglaterra

comparación productiva entre diferentes variedades, los híbridos F1 Milenio y Centroamericano, produjeron más del doble (14 212,5 y 13 368,75 kg/ha respectivamente en valores promedio), que Caturra con el promedio más bajo (5230,62 kg/ha), y también superado por Costa Rica 95 (con promedio de 9823,75 kg/ha). Tanto los enfoques metodológicos, como las innovaciones generadas, han sido socializadas ampliamente en procesos de fortalecimiento de capacidades en los países productores de café en las Américas (capacitación a más de 42 041 productores). Se ha dado soporte al diseño e implementación de políticas cafetaleras orientadas a la sostenibilidad productiva, económica, social y ambiental. Para este logro fue determinante la colaboración con PROMECAFE, los Institutos de Café en Centroamérica, RECIPROCAFE y la Alianza de Mujeres en Café. En los últimos cuatro años, el Programa Regional de Gestión Integral de la Roca (PROCAGICA-IICA-UE), ha facilitado vínculos entre la agenda de investigación/validación en el

ensayo propiamente y los protocolos de validación de innovaciones en la red de fincas de referencia en cinco países de América Central (Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica). Dada su relevancia, aun con la meta inicial de 20 años ya cumplida, la idea es seguir operando en el ensayo de largo plazo de SAF con café en CATIE. Las experiencias pioneras desarrolladas han sido fuente para otras experiencias en diferentes países, lo cual permitió ampliar la red de ensayos agroforestales para estudios de largo plazo. En este ámbito, destaca el ensayo de SAF cítricos orgánicos (Hacienda de la Toca, São Paulo, Brasil); los ensayos de café, cacao y naranjilla (INIAP-Estación Central de la Amazonia, Ecuador); el ensayo SAF café (EARTH, Caribe, Costa Rica) y más recientemente, los ensayos de largo plazo con cacao y pasturas establecidos en CATIE.

**Palabras clave:** Sostenibilidad, restauración ecológica, diseño agroforestal, estrategias de manejo

### ABSTRACT

In the late 1990s, CATIE, with the support of various institutions, began a network of long-term trials in agroforestry systems with coffee. The information gaps on agroecological interactions in systems with different long-term production approaches, and the urgent need to ensure sustainability and ecological restoration, were the main motivations. A general review of the first 20 years of continuous studies at CATIE, Turrialba is presented based on an interinstitutional and interdisciplinary process. The basic idea was to generate knowledge about the complex interactions between climate, soil, shade, levels and types of inputs and coffee varieties, which would enable the development of design and management strategies for agroforestry systems with the potential to sustain acceptable levels of productivity and the time to guarantee ecological synergies for the improvement of soil, biodiversity and environmental services. The trial was designed with six types of shade with the service species *Erythrina poeppigiana*, and the hardwoods *Terminalia amazonia* (non-fixer of Nitrogen) and *Chloroleucon eurycyclum* (fixer of Nitrogen), alone and in combination, in contrast to the control in full sun. As sub-treatments, two types of management (organic and conventional) were defined at four levels: High Conventional (AC), Moderate Conventional (MC), Intensive Organic (MO) and Low Organic (BO). The main variety of study was Caturra, in addition, they were established in some microplot systems with Costa Rica 95 and: Centroamericano, Milenio, L2A11, L3A17, L3A12 and L3A15 hybrids. After overcoming the critical phase of establishment (first two years), the research platform was consolidated, generating an invaluable database and studies over time. With the collaboration of 22 universities and institutions from different parts of the world, 41 undergraduate and graduate theses, 23 scientific articles in international journals and 2 technical documents for different audiences were developed. The results, using a matrix synthesis of the studies of the evaluated systems, indicate key elements about agroecological interactions and their links with productive sustainability and ecological synergies. The production systems with the Caturra variety in full sun and or with two drastic annual prunings of the shade trees (low contribution of biomass and a lot of light input) with AC and MC management, even with high levels of productivity, had a negative impact in biophysical variables and in environ-

mental services. The AFS with *Terminalia* and with Caturra in BO management lost viability in the first 10 years. The AFS as a whole improved the microclimate. In particular, AFS with *Erythrina* presence improved productive performance and environmental services. All the AFS presented a better valuation of environmental services than the systems in full sun. The AFS that stood out in productivity and environmental services were *Erythrina* in MO management and MC management. The *Erythrina* and *Erythrina* plus *Chloroleucon* systems, both in BO management, have presented good profitability, with low costs and good valuation in environmental services. Regarding the productive comparison between different varieties, the Millennium and Central American F1 hybrids produced more than double (14212,5 and 13368,75 kg/ha respectively in average values) than Caturra with the lowest average (5230,62 kg/ha), and also surpassed by Costa Rica 95 (with an average of 9823,75/ha). Both the methodological approaches and the innovations generated have been widely socialized in capacity building processes in the coffee producing countries of the Americas (training more than 42,041 producers). Support has been given to the design and implementation of coffee policies aimed at productive, economic, social and environmental sustainability. The collaboration with PROMECAFE, the Coffee Institutes in Central America, RECIPROCAFE and the Alliance of Women in Coffee was decisive for this achievement. In the last four years, the Regional Program for Comprehensive Rust Management-PROCAGICA-IICA-EU has facilitated links between the research/validation agenda in the trial and the innovation validation protocols in the network of reference farms in five Central American countries (Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua and Costa Rica). The pioneering experiences developed have been a source for other countries beyond Costa Rica, this allowed expanding the agroforestry trials network for long-term studies. In this area, the Organic Citrus AFS Trial (Toca Farm, São Paulo, Brazil), the Coffee, Cacao and Naranjilla Trial (INIAP-Central Amazon Station, Ecuador), the Coffee AFS Trial (EARTH, Caribbean Coast, Costa Rica) and more recently, the long-term trials with cacao and pastures established at CATIE.

**Keywords:** Sustainability, ecological restoration, agroforestry design, management strategies

## INTRODUCCIÓN

Al final de los años 1990, el sector cafetalero enfrentaba el gran reto de reinventarse en medio de una crisis sin precedentes vinculada al modelo de producción y comercialización. Por un lado, los precios internacionales llegaban a su valor mínimo en un siglo (OIC 2002), con repercusiones dramáticas en las economías de los países productores, en particular con el aumento del desempleo y la pobreza. Sumado a lo anterior, importantes eventos como sequías y huracanes afectaron fuertemente países de América Central y, en particular, se evidenciaba el inicio de alteraciones en la regularidad de las lluvias (CEPAL 2003). La caficultura pasó a ser muy vulnerable, situación agravada por la crisis económica y social, basada en la dependencia de insumos externos a base de petróleo, con altos costos de producción y bajos precios de comercialización y criticada por promover impactos ambientales negativos que llevaron al límite el agotamiento de un modelo insostenible y degradante de los agroecosistemas (Soto *et al.* 2006).

En este marco, se incrementó sustancialmente la conciencia sobre la necesidad de promover una caficultura con un nuevo enfoque y, al respecto, la Organización Internacional de Café (OIC) comunicó en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible-2002, realizada en Johannesburgo que “*La OIC reconoce que el desarrollo sostenible tiene una dimensión económica y social y también una dimensión medioambiental*”. Así, crecieron las propuestas de promoción de una caficultura más sostenible, diversificada y más equitativa y, en este contexto, surgen la mayoría de los sellos/certificaciones que conocemos hoy día. Desde el punto de vista productivo, se masifican las propuestas de protocolos y opciones de diseños y manejo de sistemas de producción para la promoción de la sostenibilidad en la caficultura. Los sistemas agroforestales y prácticas orgánicas, consideradas amigables y agroecológicas, pasaron a ocupar un espacio muy visible e importante.

El Proyecto CATIE-MIP-AF/NORAD (1999-2004), con el apoyo del consulado de Noruega, impulsó el proceso de desarrollo de experimentos de largo plazo. El propósito fue entender la complejidad de las interrelaciones entre diferentes factores agroecológicos en los sistemas de producción agroforestal en café, como cultivo perenne. Un grupo de expertos internacionales de CATIE, CIRAD y otras organizaciones hicieron una exhaustiva revisión sobre las bases científicas de propuestas de largo plazo de producción agroforestal en café con enfoques de sostenibilidad. La conclusión fue enfática: no había estudios de

largo plazo que permitieran entender las implicaciones de uno u otro enfoque productivo utilizando como base la producción agroforestal de largo plazo. Las investigaciones casi siempre se desarrollaban en periodos cortos y sin considerar enfoques interdisciplinarios ni de análisis de las diferentes dimensiones de los sistemas productivos. Es así como en el año 1999, un equipo de investigación de CATIE, en colaboración con otros grupos internacionales, iniciaron un proceso de planificación de una red de experimentos de largo plazo para la evaluación de diferentes sistemas de producción y plantean que, para el diseño de sistemas mejorados de producción se deberían considerar las siguientes variables (Haggar *et al.* 2001):

***Clima.* El café en América Central se produce en un rango amplio de condiciones climáticas, desde zonas bajas, calientes y secas ... a zonas altas, frías y húmedas ...el clima es una de las variables de partida más importantes.**

***Varietades de café.* El mejoramiento y selección de variedades ha sido dirigido a aumentar el rendimiento y la tolerancia a la roya (*Hemileia vastatrix*). No obstante, los criterios de selección de variedades continúan en debate considerando la calidad, productividad y tolerancia a plagas.**

***Insumos para el manejo de fertilidad de suelos y plagas.***

**En sistemas de alta utilización de insumos, los fertilizantes químicos son aplicados en niveles superiores a la cantidad de nutrientes exportados. En estos sistemas, la aplicación calendarizada de plaguicidas busca prevenir los problemas de plagas. En el otro extremo, se cultiva café sin la aplicación de fertilizantes y/o plaguicidas. Entre estos dos extremos existen diversas estrategias de manejo de plagas y fertilidad del suelo.**

***Estrato arbóreo.* Los árboles asociados al café afectan su fisiología, los nutrientes, la flora y fauna dentro y sobre el suelo. Los árboles también contribuyen con leña, madera y frutas a la economía familiar para consumo y venta (Beer *et al.* 1998, citado por Haggar *et al.* 2001).**

Para este momento se plantea la sostenibilidad como un criterio fuerte para el diseño de los mejores sistemas de producción en las décadas futuras (Fernández y Muschler 1999 citados por Haggar *et al.* 2001). Por otro lado, se discutía si era suficiente el enfoque de sostenibilidad

como mecanismo para “mantener e incrementar la producción, y la calidad de los recursos”. Adicionalmente, se planteaba considerar los sinergismos ecológicos “en la búsqueda de sistemas mejorados de producción de café”, a partir de la combinación de tipos de sombra con tipos de manejo (Haggar *et al.* 2001):

**“Nos referimos a las interacciones positivas entre el clima, la sombra, los niveles y tipos de insumos y la variedad de café que resultan en eficiencias no esperadas, mayores niveles de producción o de calidad, facilidades para el manejo del sistema o su capacidad de recuperación (resiliencia). Estos sinergismos se manifestarían mediante mejoras en el sistema de producción que van más allá de la sostenibilidad y que podrían ser el producto de mejoras en la vida biológica del suelo y la materia orgánica, la velocidad de reciclaje de los nutrientes o en la sincronización entre los procesos productivos y el reciclaje de nutrientes, la dinámica de la red alimenticia o la sucesión.”**

Bajo los elementos orientadores mencionados, un grupo de científicos del proyecto CATIE-MIP-AF/NORAD inició en el año 2000, el establecimiento de dos experimentos de largo plazo (uno en Costa Rica y otro en Nicaragua), para evaluar múltiples sistemas de producción. Para lograr el gran desafío de iniciar un esfuerzo pionero en el mundo se plantearon los siguientes objetivos de evaluación de sostenibilidad y sinergismos agroecológicos en café (Haggar *et al.* 2001):

**1. Evaluar los efectos de la composición y el tipo de sombra, de tipos y niveles de insumo convencionales y orgánicos, y variedades sobre el crecimiento, rendimiento y calidad del café, la dinámica de plagas, flora, fauna, ciclos de nutrientes y materia orgánica.**

**2. Medir el crecimiento y desarrollo de diferentes estratos arbóreos en términos de acumulación de biomasa, producción de leña, madera y producción de hojarasca; evaluar su efecto sobre microclima, biología del suelo y materia orgánica.**

**3. Contrastar las interacciones entre sombra, estrategias de manejo de nutrientes, plagas y variedades en diferentes**

**zonas de producción de café, de acuerdo con las lluvias, la altitud y los tipos de suelos.**

**4. Desarrollar métodos para la identificación de sinergismos y la evaluación de la sostenibilidad económica, ecológica y productiva de los sistemas de producción con café.**

**5. Promover enfoques integrados entre disciplinas e instituciones para investigar en sistemas de producción con café en América Central.**

Este artículo presenta, en forma de síntesis, el diseño experimental, la gestión, logros, desafíos y hallazgos generales vivenciados en los primeros 20 años (meta inicial propuesta) del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café ubicado en Costa Rica.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Definición del diseño del ensayo**

La tarea de definición del diseño del experimento de largo plazo estuvo a cargo de un grupo interdisciplinario de técnicos y científicos de CATIE y CIRAD (con apoyo del Instituto Nacional de Café de Costa Rica, ICAFE), con experiencia en los campos de la agroecología, agroforestería, agronomía, silvicultura, cuencas hidrográficas, fisiología vegetal, fitopatología, entomología, malherbología (estudio de hierbas del suelo), edafología, ecología y fitomejoramiento. El proceso de análisis fue muy amplio e intenso, pero también un reto para el grupo de profesionales con experiencias muy variadas. Las primeras reuniones de trabajo se desarrollaron en 1999 y siguieron durante los primeros siete meses del año 2000, cuando se llegó al acuerdo de un diseño de investigación que permitiera:

- Contar con estructura experimental para valoración de múltiples variables vinculadas a la exploración del conocimiento en las distintas interacciones agroecológicas del complejo integrado por suelos, diversidad de hierbas, variedades de café, especies arbóreas, clima-microclima.
- Con un número de sistemas y diseño con alto potencial de comparabilidad y contrastes, y que al mismo tiempo no representara niveles de complejidad de difícil exploración.
- Con la dimensión adecuada que permitiera, por un lado, contar con área mínima de referencia para el diseño agroforestal, y por otro de gestión manejable.
- Con diseño experimental robusto y con una oferta amplia de posibilidades de estudios vinculados a los temas de protocolos de base mínimos, y

posibles temas de interés incorporados por propuestas del personal científico que se vinculara a las investigaciones.

### Componentes del ensayo

#### a) Especies arbóreas seleccionadas

Se definieron criterios básicos para la selección de las especies arbóreas, entre ellos:

- Una especie de servicio (aporte de biomasa aérea, fijación de nitrógeno en suelo, facilidad de regulación de sombra, referenciada en cafetales de Costa Rica y América Central)
- Una especie maderable no fijadora de nitrógeno, de potencial económico para diversificación y nativa
- Una especie maderable fijadora de nitrógeno, de potencial económico para diversificación y nativa
- Bajo los criterios anteriores, se seleccionaron las siguientes especies (Figura 1):
  - Poró (*Erythrina poeppigiana*); procedencia Turrialba, Costa Rica: finca la Roncha; finca CATIE, sector Bonilla 2. Siembra en estacas. Especie muy utilizada en cafetales de Costa Rica y América Central.
  - Roble coral (*Terminalia amazonia*); procedencia Coto Brus (semilla), vivero Horquetas de Sarapiquí, Costa Rica. Especie utilizada en cafetales de la zona sur de Costa Rica.

- Cashá (*Chloroleucon eurycyclum* Barney & Grimes, sinónimos: *Abarema idiopoda*, *Pithecellobium pseudotamarindus*); procedencia de las comunidades de Paraíso y San Miguel de Sixaola, Talamanca (semilla: proyecto Corredor Biológico Talamanca Caribe-CBTC); vivero forestal de CATIE. Especie conocida en sistemas agroforestales en Talamanca, pero sin referencias previas de uso en cafetales.

#### b) Variedades de café

Como variedad principal de estudio se definió el Caturra, considerando su predominancia en cafetales de Costa Rica y en otros países de la región centroamericana. De forma complementaria se establecieron micro-parcelas con Costa Rica 95 y 6 híbridos del programa CATIE-CIRAD-PROMECAFE/institutos de café (Centroamericano Milenio; L2A11; L3A17; L13A12; L3A15).

#### c) Tipos y niveles de manejo

Se plantearon dos tipos de manejo: convencional con uso de agroquímicos sintéticos y abonos orgánicos y dos niveles de aplicación de insumos distintos para cada uno. Para el manejo convencional se definieron un nivel alto convencional (AC), el equivalente al paquete de altos insumos (manejo recomendado por ICAFE para muy



Poró  
(*Erythrina poeppigiana*)  
(Foto: E. de M. Virginio Filho, 2012)

Roble coral  
(*Terminalia amazonia*)  
(Foto: G. Sanches Dolenc, 2017)

Cashá  
(*Chloroleucon eurycyclum*)  
(Foto: G. Sanches Dolenc, 2017)

**Figura 1.** Especies arbóreas consideradas en el ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica

altos rendimientos) y un nivel moderado convencional (MC), más amigable ambientalmente y como referencia a un modelo de transición. Para los manejos convencionales se definieron protocolos tomando como referencia principal las indicaciones de los manuales técnicos del ICAFE (ICAFE 1998). En particular el MC buscó combinar aplicaciones moderadas de insumos sintéticos con algunas prácticas agroecológicas tales como sombra regulada de árboles de servicio y manejo selectivo de la cobertura de hierbas del suelo (Haggar *et al.* 2001).

La definición de los manejos orgánicos fue mucho más compleja, ya que no se contaba con referencias sólidas que permitieran perfilar las posibles respuestas de largo

plazo a diferentes intensidades y tipos de bioinsumos. En este sentido, con la información sistematizada en diferentes fincas orgánicas y con la recopilación de información documental de algunos estudios puntuales, se elaboró un protocolo inicial que luego se ajustó a partir del aprendizaje de los primeros siete años del experimento. Los niveles de manejo orgánico definidos fueron orgánico intensivo (MO) y un orgánico bajo (BO). El MO buscaba las condiciones para una producción orgánica de alta productividad y rentabilidad y el BO una producción con base en insumos mínimos, pero siempre con potencial de productividad y rentabilidad aceptables. En líneas generales, los detalles de los diferentes manejos están indicados en la Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Tipos y niveles de manejo/insumos utilizados en el ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica

	Niveles de manejo			
	Alto convencional (AC)	Moderado convencional (MC)	Orgánico intensivo (MO)	Bajo orgánico (BO)
<b>Tipos de fertilizantes (enmiendas y foliares)</b>	Químicos sintéticos	Químicos sintéticos	Orgánicos (gallinaza, pulpa de café, minerales)	Orgánico (pulpa de café)
<b>Nivel de fertilizantes aplicados</b>	Altas dosis de fórmulas completas y nitrogenadas (> 250 kg/ha) al suelo y tres fertilizaciones foliares al año	Dosis intermedias de fórmulas completas y nitrogenadas al suelo con una aplicación foliar al año	Altas cantidades de enmiendas orgánicas (10 ton/ha/año) y 100 kg/ha/año de minerales, tres aplicaciones por año de biofermentos foliares	Baja cantidad de enmienda orgánica (5 ton/ha/año), sin aplicaciones de biofermentos
<b>Manejo de hierbas del suelo</b>	Seis aplicaciones anuales de herbicida con suelo libre de hierbas	Cinco aplicaciones anuales de herbicida en la banda de fertilización de los cafetos. Se mantiene calle con cobertura regulada con chapeas (4)	Cuatro chapeas anuales con manejo selectivo de buenas hierbas como cobertura	Cuatro chapeas anuales con manejo selectivo de buenas hierbas como cobertura
<b>Manejo de plantas de café (podas, resiembras)</b>	Podas selectivas anuales por tallo/planta Resiembras anuales	Podas selectivas anuales por tallo/planta Resiembras anuales	Podas selectivas anuales por tallo/planta Resiembras anuales	Podas selectivas anuales por tallo/planta Resiembras anuales
<b>Control de enfermedades del café</b>	De 2 a 3 aplicaciones anuales de fungicidas	De 1 a 2 aplicaciones anuales de fungicidas	Según incidencia (fungicidas para agricultura orgánica)	No se hace control
<b>Control de plagas insectiles</b>	Insecticidas químicos. Cosecha total de frutos y trampas atrayentes (broca)	Insecticidas químicos por focos. Cosecha total de frutos y trampas atrayentes (broca)	Insecticidas naturales por focos y control biológico. Cosecha total de frutos y trampas atrayentes (broca)	Cosecha total de frutos
<b>Manejo de los árboles</b>	Poda de formación de los maderables en los primeros años. Podas drásticas (2) anuales de <i>E. poeppigiana</i>	Poda de formación de los maderables en los primeros años. Podas moderadas (2) anuales de <i>E. poeppigiana</i>	Poda de formación de los maderables en los primeros años. Podas moderadas (2) anuales de <i>E. poeppigiana</i>	Poda de formación de los maderables en los primeros años. Podas moderadas (2) anuales de <i>E. poeppigiana</i>

Fuente: Elaborado con base en Virginio Filho *et al.* (2015)

#### d) Diseño experimental

Para cumplir los objetivos generales de investigación, y con base en la disponibilidad de terreno, la optimización de toma de datos de diferentes variables y los costos operativos a lo largo del tiempo, se definió un diseño experimental con seis tratamientos de sombra (SAF), con las especies indicadas anteriormente, un tratamiento a pleno sol como testigo y cuatro sub-tratamientos de manejo (tipos y niveles: AC, MC, MO, BO). De esta manera, además del testigo café a pleno sol se definió los siguientes SAF:

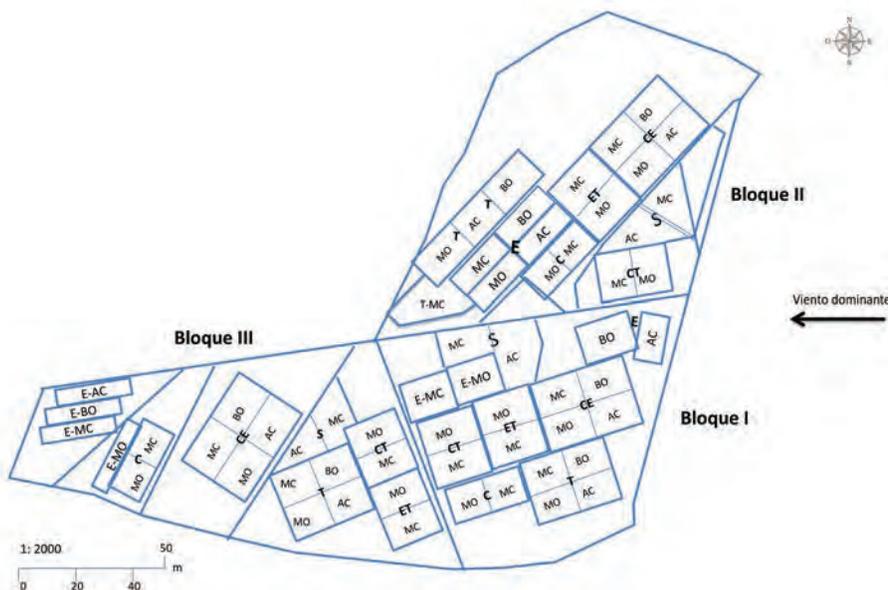
- SAF 1=** Asocio café con árbol de servicio *Erythrina poeppigiana* (poró), con manejos AC, MC, MO, BO  
**SAF 2=** Asocio café con árbol maderable no fijador de nitrógeno *Terminalia amazonia* (roble coral/ amarillón) con manejos AC, MC, MO, BO  
**SAF 3=** Asocio café con árbol maderable fijador de nitrógeno *Chloroleucon eurycyclum* (cashá), con manejos MC, MO  
**SAF 4=** Asocio café con árbol maderable no fijador de nitrógeno *T. amazonia* (roble coral/amarillón), combinado con árbol fijador de nitrógeno *C. eurycyclum* (cashá), con manejos MC, MO  
**SAF 5=** Asocio café con árbol maderable no fijador de nitrógeno *T. amazonia* (roble coral/amarillón) combinado con árbol de servicio *E. poeppigiana* (poró), con manejos MC, MO  
**SAF 6=** Asocio café con árbol maderable fijador de nitrógeno *C. eurycyclum* (cashá) combinado con árbol de servicio *E. poeppigiana* (poró), con manejos AC, MC, MO, BO

Los siete tratamientos (seis SAF más el testigo pleno sol) y sus respectivos sub-tratamientos de manejo (AC, MC, MO, BO), fueron establecidos en tres repeticiones (bloques). Un detalle importante está asociado al hecho de que no todos los tratamientos tuvieron los cuatro sub-tratamientos de manejo, debido a que los expertos consideraban que no había mucho interés en contar con testigos orgánicos a pleno sol. Desde el punto de vista de vínculos comparativos entre los diferentes sistemas en estudio, el MC está representado en todos los tratamientos, incluso en el testigo café en pleno sol. Para los seis SAF, además del MC, el MO está presente en todos. En este sentido, el diseño experimental es en bloques completos al azar con arreglo de tratamientos factorial incompleto.

En cada repetición (bloque), se tiene la combinación de los seis SAF más el pleno sol y sus respectivos sub-tratamientos (tipos y niveles de manejo), integrando así 20 sistemas diferentes (18 en SAF y 2 a pleno sol).

#### e) Arreglo espacial de unidades experimentales

Los 20 tratamientos y sus tres repeticiones fueron ubicados en parcelas principales (SAF y pleno sol) y subparcelas de manejo, siguiendo un diseño de parcelas divididas (Figura 2). Luego de hacer la distribución de los bloques, fue necesario hacer ajustes en la forma de algunas parcelas considerando la geografía y tamaño del terreno disponible.



**Figura 2.** Distribución de parcelas (sistemas), subparcelas (manejos) y bloques (repeticiones) del ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica.

Parcelas: SAF 1. *Erythrina poeppigiana* (poró) = E. SAF 2. *Terminalia amazonia* (roble coral/amarillón) = T. SAF 3. *Chloroleucon eurycyclum* (cashá) = C. SAF 4. *Terminalia a.* + *C. eurycyclum* = CT. SAF 5. *T. amazonia* + *E. poeppigiana* = ET. SAF 6. *C. eurycyclum* + *E. poeppigiana* = CE. PLENO SOL = S.

Subparcelas: AC = Alto convencional. MC= Moderado convencional. MO= Orgánico intensivo. BO= Bajo orgánico.

Los arreglos espaciales en cada unidad experimental fueron establecidos con distancias de siembra para el café de dos metros entre filas y de un metro entre plantas. Para los árboles se adoptó una distancia de siembra inicial de seis metros entre filas y cuatro metros entre plantas. El tamaño de cada parcela tuvo una relación directa con el total de subparcelas de manejo, de manera que los tratamientos con cuatro niveles de manejo tienen parcelas con dimensiones de entre 3200 m<sup>2</sup> y 4088 m<sup>2</sup>, mientras que los sistemas con dos manejos tienen dimensiones que van de 1612 m<sup>2</sup> a 2132 m<sup>2</sup>.

### **f) Hipótesis generales de la plataforma de investigación**

Los científicos que participaron en la planificación del ensayo de largo plazo definieron hipótesis generales buscando orientar el desarrollo de las investigaciones en función de preguntas centrales formuladas durante la definición del diseño experimental. Durante los 20 años de estudios, se amplió la formulación de las diferentes hipótesis atendiendo a actualizaciones temáticas requeridas. A continuación, se presentan las hipótesis planteadas en la fase de planificación del experimento.

#### **- Efectos de la sombra sobre la producción y nutrientes:**

1. Café bajo sombra tiene rendimientos más estables que café a pleno sol
2. Café bajo sombra de árboles fijadores de nitrógeno tiene rendimientos más estables y con un mejor nivel nutricional que café bajo sombra de árboles no-fijadores
3. Café bajo sombra permite un mantenimiento fácil en el grado de sombra deseada y tiene rendimientos mayores y más estables que café bajo sombra de regulación difícil
4. Café bajo sombra produce granos de mejor calidad
5. Para eficiencia en rendimiento y sostenibilidad, el nivel de sombra debe variar con el nivel de insumos para el manejo de la fertilidad del suelo

#### **- Efectos de la sombra sobre el microclima para café:**

6. Sombra mezclada de árboles de diferente fenología es un mejor ambiente para café que sombra de especies de fenología uniforme
7. Árboles con una sombra densa y compacta compiten más con el café que árboles con una sombra abierta y amplia
8. Un dosel multi-estrato permite mayor penetración de luz que un dosel de un solo estrato

#### **- Efectos de la sombra sobre las plagas:**

9. Café bajo sombra tiene poblaciones de plagas más estables y más bajas
10. El estado nutricional mejorado de café bajo árboles fijadores de nitrógeno reduce las plagas
11. Sombra con mayor micro-variabilidad incrementa los focos de plagas y la complejidad en el manejo de las mismas
12. El nivel ideal de sombra depende del nivel de insumos para el manejo de fertilidad y plagas

#### **- Efecto de insumos para fertilidad del suelo:**

13. Café con mejor nutrición tiene menores problemas de plagas insectiles y enfermedades
14. Café con insumos orgánicos tiene rendimientos más estables que café con insumos químicos

#### **- Variedades:**

15. Variedades resistentes resultan en rendimientos mayores y más estables y costos de producción menores

#### **- Clima:**

16. La altura tiene un efecto mayor sobre la calidad de café que la sombra
17. Sombra es de menor importancia en la sostenibilidad de la producción de café en zonas más húmedas y más cerca de la altura de producción óptima

### **g) Temas generales de monitoreo durante los estudios**

A lo largo de su existencia, el ensayo ha generado una amplia base de datos vinculados con los temas centrales de la investigación. De manera complementaria, muchas de las diferentes investigaciones desarrolladas también trataron temas específicos que se sumaron al conjunto de datos generados. A continuación se indica la lista general de los temas que orientan los monitoreos constantes y las evaluaciones a lo largo del tiempo:

- 1) Evolución de la fertilidad de suelos
- 2) Micro y macro fauna del suelo
- 3) Diversidad de hormigas
- 4) Diversidad de aves y mamíferos
- 5) Monitoreo de hierbas del suelo
- 6) Agotamiento de cafetos (podas)
- 7) Enfermedades y plagas del café
- 8) Producción y calidad de café
- 9) Costos, ingresos y rentabilidad
- 10) Rendimiento y calidad de café
- 11) Desarrollo de árboles (volumen de madera) y porcentaje de sombra

- 12) Aporte de materia orgánica y nutrientes con los árboles
- 13) Carbono en los sistemas, incluidos los suelos
- 14) Información meteorológica (temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación, viento, evapotranspiración)

### Ubicación

Luego de revisar algunas áreas disponibles, el terreno seleccionado (9, 25 ha) para el ensayo de largo plazo se ubicó en el sector Bonilla 2 de la finca del CATIE, Turrialba, Costa Rica, con las siguientes coordenadas: 9°53'44" latitud norte y 83°40'07" longitud oeste (Figura 3).



**Figura 3.** Ubicación del ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica. Foto: imagen de satélite, Proyecto MACACC, diciembre 2013

La elevación aproximada es de 600 msnm. Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge, el ensayo se ubica en tipología de influencia del Bosque Premontano Muy Húmedo (bpmh) (Jiménez 2003, citado por Merlo 2007).

El suelo del sitio seleccionado está ubicado en una ligera pendiente; fue escogido en particular por sus dimensiones y buena fertilidad superficial, a pesar de que tres años atrás había estado cultivado de caña de azúcar y, anteriormente y durante muchos años bajo pasto. El ensayo de largo plazo fue establecido el 28 de agosto del año 2000.

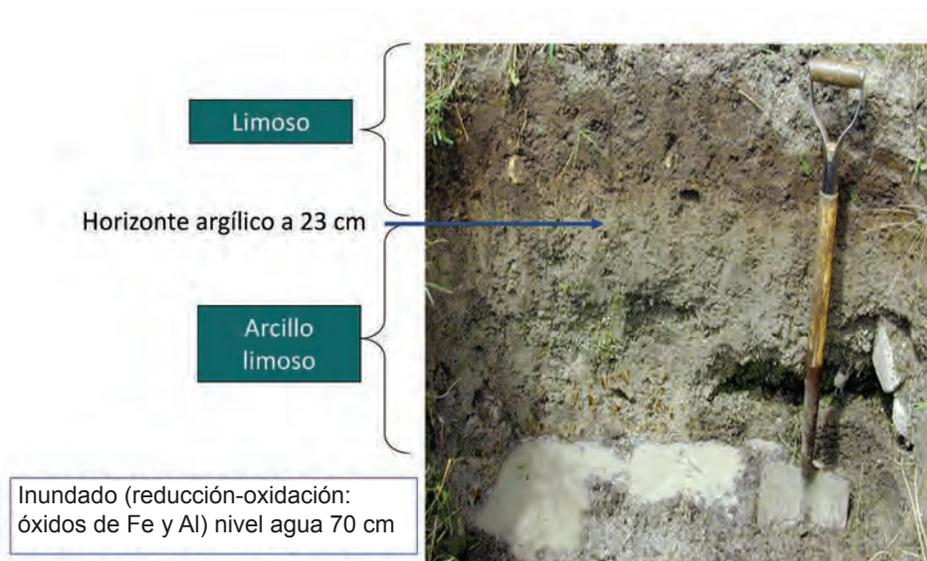
### a) Clasificación de los suelos

Los análisis iniciales (McDaniel y Kaas, 2001), determinaron que los suelos del área de ensayo eran aluviales mixtos con Ultisol (Endoaquult) e Inceptisol (Endoaquept).

La textura de estos suelos en los primeros horizontes se determinó entre franco y franco-arcilloso (figuras 4, 5 y 6). La caracterización del suelo permitió determinar además que el perfil más fértil era de poca profundidad y, en general, no sobrepasaba los 30 cm. Por otro lado, se confirmó el efecto de nivel freático superficial con la presencia de reducción-oxidación de Fe y Al (Figura 5.). Las limitantes de drenaje encontradas hicieron que el personal experto en suelo expresara sus dudas sobre la posibilidad de que el ensayo se pudiera establecer con éxito.



**Figura 4.** Apertura de calicatas para la caracterización del suelo del ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica. Foto: E. de M. Virginio Filho (2001)



**Figura 5.** Perfil del suelo Ultisol (Endoaquult), setiembre 2021, del ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica. Foto tomada de McDaniel y Kass (2001)

- Depositiones aluviales más recientes.
- Sin acumulación de arcilla en subsuelo.



**Figura 6.** Perfil del suelo Inceptisol (Fluvaquentic endoaquept), setiembre 2001, del ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica. Foto tomada de McDaniel y Kass (2001)

En la fase de establecimiento se tomaron muestras de suelo en seis puntos a tres profundidades en cada una de las 60 parcelas de investigación. Las muestras recolectadas se montaron en una colección de suelo original que permanece guardada para análisis futuros eventuales con el fin de explorar los posibles cambios a lo largo del tiempo.

#### **b) Condiciones climatológicas**

Las características del clima, basadas en datos de la estación climatológica de CATIE para la época del

establecimiento del ensayo, indicaban los siguientes promedios anuales: precipitación 2651 mm, temperatura 21,8°C, humedad relativa 88% y radiación solar 16,9 MJ/m<sup>2</sup> (Virginio Filho *et al.* 2002).

Dada la relevancia de las interacciones biofísicas estudiadas y el comportamiento histórico del clima, se hizo una categorización por décadas de algunas variables climáticas del área del ensayo (Cuadro 2). Para una mejor contextualización del clima a lo largo del tiempo, se inició la categorización de variables con

**Cuadro 2.** Cambios y variabilidad climática en el sitio del ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica

Décadas evaluadas	Precipitación promedio anual (mm)	Humedad relativa promedio anual (%)	Temperatura (°C)			Radiación promedio anual (MJ/m <sup>2</sup> )
			Promedio anual	Promedio anual de máximas	Promedio anual de mínimas	
1969-1979	2704,1	87,5	21,4	26,7	18	18,4
1980-1990	2495,9	88,5	21,7	27	18,1	16,3
1991-2001	2872,7	88,2	22	28,5	18,2	16,1
2002-2012	2988,6	90,4	22,1	27,9	18,4	15,8

Fuente: elaboración con datos de la estación meteorológica del CATIE. Tomado de Virginio Filho *et al* (2018)

dos décadas de anticipación al establecimiento del ensayo, tomándose como base el año 1969. En síntesis, el comportamiento de las variables climáticas ha estado marcado por incrementos importantes de los promedios anuales de precipitación, humedad relativa y temperaturas máximas y por una reducción en la radiación promedio anual.

### Gestión de la plataforma de investigación

Desde su concepción, los ensayos de largo plazo en café (tanto en Nicaragua, en la zona baja seca de Masatepe), como el ensayo en CATIE, Turrialba, Costa Rica, fueron establecidos para ser plataformas de colaboración dinámica entre investigadores, estudiantes, personal técnico, productores, organizaciones e instituciones vinculadas con la generación de conocimientos enfocado en la promoción de enfoques sostenibles y agroecológicos para la caficultura. En este sentido, se pueden describir dos fases marcadas en el desarrollo de la gestión de los estudios de largo plazo:

#### a) Primera fase de planificación y establecimiento (2000 a 2004)

Desde su fase inicial, el ensayo de largo plazo SAF café, establecido en Turrialba contó con un comité técnico-científico directivo, conformado por tres especialistas del proyecto CATIE-MIP-AF/NORAD, incluido el coordinador del ensayo en la sede de CATIE. Por su parte, un asistente asumió la función de ejecución y coordinación de actividades de campo.

La fase de planificación y establecimiento (2000 y 2001) contó con los aportes de un comité técnico-científico asesor integrado por personal de CATIE y CIRAD. Para esta fase, hubo aportes complementarios de técnicos del ICAFE, Turrialba, de la Wisconsin University y de la University of Maryland.

A partir del 2002, se estableció de manera más formal, un vínculo entre el comité-técnico científico directivo, el comité técnico-científico asesor y profesores investigadores de la Universidad de Costa Rica (UCR), en particular de la carrera de Agronomía del campus de Turrialba, quienes pasan a integrar la plataforma científica y a colaborar con diferentes acciones hasta el presente.

En esta primera fase de planificación y establecimiento, fue constituido un comité asesor de productores (Figura 7) que, en colaboración con la coordinación del ensayo y el comité técnico-científico, intercambiaban criterios importantes para la consolidación de los protocolos del manejo del ensayo de largo plazo. Integraron este comité, miembros de la Asociación de Productores Orgánicos de Turrialba (APOT) y productores convencionales de Turrialba. También aportaron a este comité, el encargado de café orgánico comercial de CATIE y los técnicos de la oficina regional del ICAFE en Turrialba. Para este proceso el comité técnico-científico asesor contaba con los aportes de investigadoras de la UCR y una especialista en agricultura orgánica de CATIE.

Durante la fase de establecimiento, los intercambios de criterios con el Instituto del Café de Costa Rica, fueron muy útiles para afinar el protocolo de manejo de los diferentes sub-tratamientos. En junio del 2003 se realizó un intercambio entre técnicos/especialistas del ICAFE y el comité técnico-científico del ensayo de largo plazo. En este intercambio se analizaron temas claves como: el sistema de poda de cafetos, estrategias de control de plagas y enfermedades, manejo de la sombra, así como el primer estudio de calidad de café realizado con el apoyo de un pasante de la UCR. Se acordó también iniciar el proceso de socialización de las experiencias con productores y personal técnico de café del país, considerando los avances logrados en la fase inicial de establecimiento.



**Figura 7.** Intercambio entre el comité de productores y personal científico CATIE-UCR- Setiembre de 2003, ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica. Foto: Ensayo SAF Café- CATIE

**b) Segunda fase - intensificación de monitoreo y estudios (2005-2020)**

A partir del 2005, superados los grandes retos de la fase de establecimiento, el ensayo de largo plazo experimentó una intensificación de estudios y monitoreos. La gestión del experimento pasó a estar concentrada en la coordinación general del ensayo y el comité técnico-científico directivo en contacto directo con diferentes grupos y proyectos de investigación. Al inicio de esta segunda fase se incorporó al comité asesor el especialista en bioestadística de CATIE, quien con su equipo pasó a apoyar el proceso de la planificación de las investigaciones y de análisis de datos generados por diferentes estudios.

En el 2007 el ensayo pasó a vincularse a la Plataforma Científica Sobre Sistemas Agroforestales a Base de Cultivos Perennes en Mesoamérica (PCP), coordinada por CIRAD y con la participación de diferentes organismos internacionales (CATIE, Bioversity International, CABI, IICA, World Agroforestry Centre, INCAE y PROMECAFE) alcanzando aproximadamente 60 investigadores para el año 2017. El objetivo del PCP es “Contribuir al incremento de la productividad, competitividad, y sostenibilidad de los sistemas agroforestales con cultivos perennes en Mesoamérica”, y el ensayo SAF café aportó y aporta, de manera oportuna,

un espacio para la generación de investigaciones de manera interdisciplinaria e interinstitucional.

Mantener actualizada la generación y el registro de datos de los distintos temas y variables de estudio ha sido todo un reto a lo largo del tiempo. El equipo base de coordinación y de seguimiento de campo del ensayo ha tenido en la estrategia de colaboración con diferentes universidades nacionales e internacionales, un apoyo relevante con el programa de pasantías e intercambios académicos. Lo anterior ha permitido la conformación de una base de datos histórica robusta para muchas variables clave, como el aporte de 83 pasantes (44 mujeres, 39 hombres) de 36 universidades y siete instituciones de diferentes países (Alemania, Brasil, España, Honduras, Canadá, Colombia, Costa Rica, Francia, México, Puerto Rico, Reino Unido, Suiza, EUA) (Cuadro 3). Los pasantes, al mismo tiempo que fortalecieron sus capacidades y entendimiento sobre las interacciones agroecológicas, brindaron información relevante para los propósitos de la plataforma de estudio. De igual forma, el equipo de trabajadores de campo se especializó en monitoreo a fin de complementar los esfuerzos de generación de datos. Además, los investigadores y estudiantes de pregrado y posgrado, que desarrollaron diferentes investigaciones tuvieron un rol protagónico en la generación de datos.

**Cuadro 3.** Universidades (36) e instituciones (7), número de pasantes (83) del ensayo a largo plazo en sistemas agroforestales con café, 2002-2020, Turrialba, Costa Rica

Periodo	Número de pasantes/género	Institución/país
2020	1 (F)	Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia
2019	1 (F)	Eco-sur, México
2019	1 (M)	Bern University of Applied Sciences, Suiza
2019	1 (F)	Universidade Federal do Oeste de Pará -UFOPA, Brasil
2018	1 (F)	University of Toronto, Canadá
2018, 2013	2 (1 F, 1 M)	AgroSupDijon, Francia
2018	1 (M)	Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico
2017	1 (F)	Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Brasil
2017, 2012, 2011, 2010, 2002	8 (5 F, 3 M)	Universidade de São Paulo (USP), Brasil
2017	1 (F)	SUPAGRO, Francia
2017, 2016, 2014	3 (2 F, 1 M)	Université de Lorraine (ENSAIA), Francia
2017	1 (M)	Universidad Autónoma de Chapingo, México
2016, 2013	2 (M)	Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Colombia
2016, 2015	4 (2 F, 2 M)	AgroParisTech, Francia
2015	3 (2 F, 1 M)	Bordeaux-Sciences Agro, Francia
2015, 2013, 2012, 2007, 2003	5 (1 F, 4 M)	Universidad de Costa Rica (UCR), Costa Rica
2015	1(M)	Universidad de Nottingham, Reino Unido
2012	1 (F)	Universidad Nacional de Agricultura (UNA), Honduras
2012, 2002	4 (2 F, 2 M)	Universidad Nacional (UNA), Costa Rica
2011	1 (F)	Ecole Supérieure d'agro-développement international (ISTOM), Francia
2011, 2008, 2003	5 (1 F, 4 M)	Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil
2011	1 (M)	Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil
2011	1 (F)	Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil
2011, 2008	2(1 F,1 M)	Yale University, EUA
2010	2 (1 F, 1 M)	Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Costa Rica
2010	1 (M)	CENARGEN-EMBRAPA, Brasil
2009, 2007, 2005	3 (F)	ENITA de Clermont-Ferrand, Francia
2009	1 (F)	Colegio Técnico Profesional de Pacayas, Costa Rica
2008, 2007	2 (1 F, 1 M)	Universidad de Tolima, Colombia
2008	1 (F)	Purdue University, EUA
2007	1 (F)	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Venezuela
2007	1 (M)	University of Geisenheim, Alemania
2007, 2005	3 (2 F, 1 M)	Colegio Técnico Profesional de Santa María de Dota, Costa Rica
2006	1 (F)	George-August Universitat Tottingen, Alemania
2005	2 (1 F, 1 M)	Universidade Federal de Lavras, Brasil
2005	1 (F)	École Nationale Supérieure D'Agromonie et des industries Alimentaires (L'ENSAIA), Francia
2004	2 (F)	Colegio Técnico Profesional de Liberia, Costa Rica
2003	1 (M)	Universidad de Barcelona, España
2002	2 (M)	Colegio Técnico Profesional de Upala, Costa Rica
2002	1 (F)	Hamburgo University, Alemania
2002	1 (M)	The University of Vermont, USA
2002	4 (2 F, 2 M)	Colegio Técnico Profesional de la Suiza, Costa Rica
2002	1 (M)	Universidad de Bonn, Alemania

La generación de datos, en diferentes estudios, tuvo apoyos importantes en términos de servicios de laboratorio en los que se destacan los laboratorios de CATIE (suelos, raíces, fitoprotección), laboratorio de fitopatología de la UCR y el laboratorio de calidad del ICAFE. Desde el punto de vista de logística, el ensayo contó en diferentes momentos con los apoyos importantes de empresas como el beneficio Santa Rosa, Cafetalera Aquiares y Hacienda Juan Viñas, así como de la Asociación de Productores Orgánicos de Turrialba.

**c) El reto del financiamiento de estudios a largo plazo**

Para la ciencia agroforestal es determinante poder entender las interacciones agroecológicas en los ciclos largos de sistemas productivos con cultivos perennes (café, cacao, cítricos y otros frutales). Sin embargo, previo al ensayo de largo plazo establecido por CATIE y colaboradores, no había registro de experimentos similares. Una de las razones estaba relacionada con la financiación de dichos experimentos, pues en general, los ciclos de los proyectos de investigación y desarrollo difícilmente llegan a cinco años, a pesar de que se sabe que los ciclos productivos de café y otros cultivos perennes pueden pasar los 25 años.

Para el establecimiento (los primeros tres años) del ensayo de largo plazo de Turrialba, fue determinante el apoyo financiero del proyecto CATIE-MIP-AF/NORAD y de la finca del CATIE. El compromiso asumido por CATIE era el de mantener el experimento al menos por 20 años. En este sentido, la coordinación del ensayo, conjuntamente con la dirección general y administración del CATIE, estableció arreglos de gestión que fueron base para la sostenibilidad mínima de fondos para el manejo del ensayo durante este periodo. El acuerdo contempló la decisión de dar a la coordinación del experimento, la posibilidad de utilizar toda el área requerida, equivalente a 9,25 ha (área de parcelas experimentales y bordes), para producción y comercialización de la cosecha de café, de manera que los fondos generados fueron reinvertidos en el manejo básico del experimento.

Para los primeros tres años se invirtieron aproximadamente US\$20 000 por año. Entre el período 2003 y 2012, coincidente con el período de mayor producción de café, se gastó en el mantenimiento del experimento un aproximado promedio por año de US\$34 600. Para el período posterior a 2013 los gastos promedios anuales fueron de aproximadamente US\$35 700. Este último

período fue marcado por la reducción de ingresos por cosecha de café en función del fuerte impacto generado por la roya del café (*Hemileia vastatrix*). Los gastos de mantenimiento de ensayo, en su gran mayoría, estuvieron vinculados con actividades de manejo de las diferentes parcelas. En este sentido, los investigadores involucrados tuvieron que negociar de manera continua diferentes fondos para la conducción de las investigaciones a lo largo del tiempo. Los proyectos, que han financiado diferentes estudios en el ensayo se indican en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Proyectos que financiaron estudios en el ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica

Período	Proyecto
2000, 2001, 2002, 2003	CATIE-MIP-AF/NORAD
2003, 2004	University of Maryland
2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012	Innovaciones-CATIE/NORAD
2010	CAFNET-CATIE-CIRAD/UE
2011, 2013	BIOVERSITY-CATIE
2014, 2015	FTA-CATIE
2014, 2015, 2016, 2017	MACACC-CATIE-CIRAD/ARNAgrobiosphere
2015	Universidad de Nottingham-CATIE
2016	ANAEE-CoffeeFlux-CIRAD-CATIE
2016, 2017	Universidad de Toronto-CATIE
2017, 2018	PCP-CIRAD-CATIE
2018, 2019, 2020, 2021	CATIE-PROCAGICA-IICA/UE
2020 - 2021	SEACAF-Universidad de Greenwich-CATIE

Otra fuente complementaria importante de recursos para el apoyo de las investigaciones fueron los presupuestos específicos de tesis de grado y posgrado desarrollados a lo largo del tiempo (Cuadro 6).

**PRODUCTOS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**a) Las prácticas que hicieron posible el establecimiento del ensayo de largo plazo**

Sin lugar a duda, uno de los primeros resultados más importantes del ensayo de largo plazo fue la consolidación de su establecimiento en condiciones de sitio críticas. Especialistas en suelo consideraban que el nivel freático superficial podría inviabilizar el establecimiento del ensayo (McDaniel y Kaas 2001). Sumado a lo anterior, había limitantes vinculadas a:

1. Historia del uso del suelo con caña mecanizada (tres años antes del establecimiento) y, anteriormente, pasto.
2. Aunque hubo preparación del terreno antes del establecimiento del ensayo, el suelo presentaba cierta compactación que, asociado a limitantes en drenaje, generó dos situaciones críticas: en los momentos de lluvia había muchos puntos de encharcamiento superficial y cuando había sol fuerte, el suelo se secaba rápidamente.
3. En el complejo de hierbas naturales predominaban gramíneas muy agresivas que competían fuertemente con los cafetos establecidos.
4. Suelo con capa fértil superficial, con tendencia a acidez fuerte.
5. La idea del ensayo era establecer desde cero, todos los sistemas; en este sentido, cafetos y árboles fueron sembrados juntos, y en las primeras fases del establecimiento, la incidencia del sol sobre las plantas era muy fuerte.

Durante los primeros siete meses de establecimiento, el cuadro general de los cafetos sembrados no fue alentador. Había competencia de malas hierbas, pocas hojas y poco vigor, principalmente en los manejos orgánicos (Figura 8). Un punto crítico fue plantar cafetos a raíz desnuda, que durante el traslado y tiempo de espera para la siembra, pudo afectar el establecimiento adecuado de las plantas.



**Figura 8.** Poco desarrollo y vigor de cafetos y presión de malezas al final del séptimo mes del establecimiento del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica. Foto: E. de M. Virginio Filho

Durante este periodo, se inició un intenso proceso de reflexión para ajustar las condiciones del sitio y así viabilizar el establecimiento de 20 sistemas de producción con diferentes tipos e intensidades de manejo; sin embargo, las acciones desarrolladas en los primeros 12 meses todavía no daban los resultados esperados. En un informe de asesoría en septiembre de 2001, un experto internacional en agroecología, preocupado con el tamaño del ensayo y con las señales de degradación del suelo por anegación y usos previos indicó: *“Es un momento ideal para reflexionar sobre la posibilidad y el compromiso real de los investigadores de mantener y de monitorear como es debido este ensayo de 20 años...será necesario tomar decisiones tales como eliminar un bloque (el que se está comportando peor)...”*(Altieri 2001).

Para ese momento se intensificaron e incrementaron las estrategias para habilitar las condiciones mínimas del sitio con el propósito de rescatar todos los tratamientos y sus repeticiones y, en especial, los manejos orgánicos que sufrieron más en la siembra inicial. Las estrategias implementadas fueron:

1. Desde el primer momento se inició un plan de mejoramiento del drenaje en toda el área, pero como solo se pudo usar maquinaria en los bordes del ensayo (Figura 9), el sistema de drenaje se concluyó después de dos años de trabajo con el apoyo de los obreros, quienes poco a poco establecieron, a pico y pala, un sistema interno de drenaje entre los bordes de las diferentes parcelas.
2. Al final de los primeros nueve meses, el porcentaje de pérdida de cafetos en el sistema bajo orgánico fue de 30%; en el orgánico intensivo y manejos convencionales (moderado y alto), no pasó del 20% (Virginio Filho *et al.* 2002). Para la resiembra de cafetos muertos, en los manejos orgánicos ya no se utilizaron plantas a raíz desnuda y se pasó a sembrar cafetos en bolsa. Al menos en el bloque tres, fueron resembradas todas las plantas de las parcelas orgánicas. Ante las dificultades con el establecimiento de plantaciones nuevas de café orgánico en suelos con historial de limitantes críticas, el equipo de investigación, previo al establecimiento del ensayo, buscó experiencias de cafetales orgánicos iniciados desde cero en Costa Rica, pero no se encontraron (Virginio Filho *et al.* 2002). Las experiencias encontradas eran siempre de cafetales que fueron establecidos como convencionales y que luego pasaron a manejo orgánico. Hoy en día hay conocimientos y experiencias más sólidas al respecto.
3. Considerando las limitantes de acidez, se aplicó carbonato de calcio en la banda de fertilización de los cafetos en el primer y segundo año del establecimiento. Se

inició con un trabajo de monitoreo en la calidad de los abonos orgánicos utilizados y se hicieron ajustes en el programa de fertilización de los manejos orgánicos.

Los aprendizajes sobre la nutrición de cafetales orgánicos en esta fase fueron muy importantes y al respecto, el equipo de investigadores que conducían el experimento indicó (Virginio Filho *et al.* 2002):

**“Los suelos con limitantes químicas y físicas y/o degradados, ameritan una atención especial en su recuperación para la producción orgánica de café, principalmente con el supuesto de que no se dispondría de mejores terrenos para su establecimiento. Fertilización orgánica: un suelo con buenas referencias de fertilidad en base a análisis (químicos) de suelo no debe ser el parámetro principal para orientar una fertilización inicial de un cafetal orgánico. Los antecedentes de mecanización y cultivo intensivo de caña son indicativos de problemas importantes en cuanto a compactación y supresión de la actividad biológica del suelo. La fertilización orgánica no puede tampoco basarse en la pura referencia de contenidos de nutrientes en comparación con los fertilizantes sintéticos. Los ajustes en la fertilización orgánica fueron una condición clave en la recuperación de los sub-tratamientos orgánicos del ensayo, en particular de los orgánicos (intensivos). Como procedimiento más apropiado, la fertilización orgánica debería empezar antes de la siembra del café, lo anterior, con el propósito de potencializar el proceso de activación de la biología del suelo. Por otro lado, a partir de la siembra en la fertilización orgánica, los volúmenes de abono deben ser considerables, principalmente para terrenos con limitantes, de tal manera que se puedan generar las condiciones deseadas. La combinación de enmiendas orgánicas puede resultar muy positiva tanto por la facilidad de obtención como por la complementariedad de aporte nutricional. La utilización de abonos orgánicos de origen animal como la pollinaza resultó ser muy positiva con relación a la respuesta obtenida en campo.”**

4. Dada la agresividad de las hierbas competidoras al inicio del ensayo fue necesario, en los manejos orgánicos, hacer una secuencia única de tres aplicaciones de herbicidas en parchoneo dirigido a las peores hierbas. También se hicieron chapias sucesivas y diferentes estrategias de control (extracción con raíz de hierbas peores, sombra temporal, manejo de cobertura muerta). A partir del segundo año se implementó

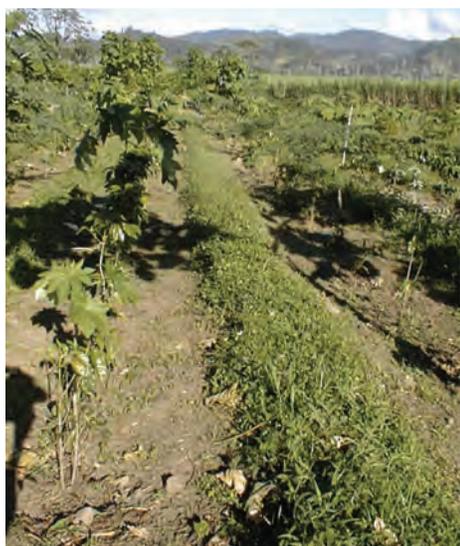
de manera normal el protocolo de manejo selectivo de hierbas del suelo buscando presionar las hierbas competidoras y favorecer la propagación de hierbas de buena cobertura presentes naturalmente en los manejos MO, BO y MC. En los primeros años para los tres manejos anteriores, se incluyó el uso de motoguadaña para el control selectivo de hierbas. Para los manejos AC el protocolo indicaba la eliminación total de hierbas con herbicida.

5. Sombra temporal con *Ricinus* sp. (higuerilla) en todos los 18 tratamientos con sistemas agroforestales



**Figura 9.** Mejoras del drenaje en límites exteriores de las parcelas del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica, julio 2002. Foto: E. de M. Virginio Filho.

Las diferentes estrategias y prácticas implementadas durante los primeros 15 meses del ensayo, fueron determinantes para superar las limitantes iniciales del sitio y concretar así el establecimiento de los tres bloques con las 60 subparcelas y, en especial, las parcelas orgánicas que habían experimentado las mayores dificultades (Figura 10). A los 18 meses de edad, el ensayo superó la fase crítica del establecimiento e inició el protocolo de manejo planificado para las investigaciones de largo plazo (Virginio Filho *et al.* 2002).



SAF Cashá -Manejo orgánico intensivo- 2001  
(muy poco desarrollo inicial)



SAF Cashá -Manejo orgánico intensivo- 2005 (mejor vigor luego de superada las limitantes iniciales del sitio).

**Figura 10.** Rescate de parcelas orgánicas desde la siembra nueva en el ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica. Se observa el contraste entre el año 2001 y 2005. Fotos E. de M. Virginio Filho..

### b) Registros y base de datos históricos

Durante dos décadas se ha elaborado una amplia base de datos con variables del suelo, cafetos, árboles y clima relacionadas a los 20 sistemas en estudio. El Cuadro 5 presenta una síntesis general del tipo de datos gene-

rados. Uno de los atractivos más importantes para las personas investigadoras es el hecho de disponer de una base de datos histórica que permite generar resultados nuevos con mayor capacidad de análisis sobre las distintas interacciones agroecológicas a lo largo del tiempo.

**Cuadro 5** Componentes de la base de datos histórica del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica

Información disponible	Años
Registros diarios de actividades de manejo y monitoreo (labores, tiempos, insumos, etc.)	2000 a 2020
<b>Análisis del suelo:</b>	
a) Química del suelo	a) 1999, 2001, 2004, 2007, 2010, 2015, 2017
b) Física del suelo	b) 2001, 2002, 2003, 2004, 2017
c) Tipos de coberturas (hojarasca, buena cobertura, malas hierbas, suelo desnudo)	c) 2002, 2005, 2008
<b>Macrofauna del suelo (lombrices):</b>	
a) Abundancia, volumen	a) 2003, 2005, 2008, 2012, 2013, 2016
b) Diversidad	b) 2003
<b>Microfauna y mesofauna del suelo:</b>	
a) Complejo microbial (hongos fitopatógenos, hongos saprófitos, bacterias aerobias, bacterias anaerobias, actinomicetos, bacterias fijadoras de nitrógeno, enterobacterias, pseudomonas) y reacción catalasa como indicador de vida del suelo	a) 2020
b) Biomasa microbial	b) 2004
c) Nemátodos	c) 2003, 2017
d) Mesofauna	d) 2017
<b>Información climatológica:</b> (precipitación, radiación solar, temperaturas, evapotranspiración, humedad relativa, velocidad del viento) (Estación CATIE y otras estaciones cercanas)	2000 a 2020

Información disponible	Años
Información microclimática y fisiológica del café (temperatura, humedad, radiación, sombra, evapotranspiración, velocidad del viento, etc.) (Proyecto MACACC- COFFEEFLUX, medición segundo a segundo de variables con torres de flujo en sistema agroforestal y en pleno sol)	2014 a 2017
<b>Cafetos:</b>	
% de sobrevivencia	2001
Datos de resiembras	2002 a 2006
Desarrollo (altura, diámetro, ramas totales, ramas productivas)	2002, 2014
Vigor	2006, 2017
Complejo de plagas y enfermedades, controladores naturales (datos mensuales)	2002 a 2020
Comportamiento de la floración	2005 a 2020
Histórico de producción de café (Caturra, Costa Rica 95, Centroamericano y Milenio, otros híbridos F1)	2004 a 2020
Evaluación de calidad de café (sanidad <sup>1</sup> , rendimiento <sup>1</sup> y catación <sup>2</sup> )	2003 <sup>12</sup> , 2004 <sup>12</sup> , 2018 <sup>1</sup>
Agotamiento de cafetos poscosecha (intensidad y tipos de poda)	2003 a 2017
Análisis químico foliar	2001
Análisis químico de frutos de café	2004
<b>Costos e ingresos anuales, rentabilidad:</b>	
a) Costos e ingresos (venta de café, madera y leña)	a) 2000 a 2020
b) Rentabilidad de los sistemas	b) 2010, 2017
<b>Datos silviculturales:</b>	
a) % de sobrevivencia de árboles	a) 2001
b) Cobertura de sombra	b) 2002, 2004, 2005, 2008, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019
c) Desarrollo de los árboles (diámetros, altura, copa)	c) 2001, 2003, 2004, 2005, 2008, 2014, 2018, 2019
d) Reducción de la densidad de árboles/área (raleos)	d) 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2018
e) Volumen de raíces y nodulación en <i>C. eurycyllum</i>	e) 2008
Biomasa de los SAF (volumen, nutrientes)	2004, 2005, 2006, 2010, 2017, 2019
<b>Servicios ambientales</b> (datos integrados hábitat, carbono suelo, C cafetos, C árboles y agua)	2000 a 2009, 2010, 2016
Biodiversidad de la fauna:	
a) Aves	a) 2008, 2017
b) Mamíferos	b) 2008
c) Insectos	c) 2001, 2008
Biodiversidad de flora:	
a) Hierbas del suelo	a) 2002, 2005, 2008
b) Epífitas	b) 2017

### c) Producción académica y técnica-científica

La plataforma del ensayo de largo plazo desarrolló durante las dos primeras décadas, 41 tesis e investigaciones con un promedio de dos estudios por año, de las cuales 22 fueron de maestría, 11 de grado, 6 de

doctorado y 2 de posdoctorado. Lo anterior es evidencia del esfuerzo colaborativo con 22 universidades e instituciones de varios países. El CATIE apoyó a 18 estudiantes de tesis en sus programas de maestría y doctorado (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Tesis y estudios de investigación desarrolladas en el ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica

Periodo	Nivel	Autor	Título	Institución/universidad
2020	Doctorado	Liliana Bueno López	Complejo microbial en suelos de sistemas de café agroforestales, con 20 años de establecimiento	Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia/CATIE
2020	Doctorado	Emmanuel Lasso	Discovering weather periods and crop properties favorable for coffee rust incidence from feature selection approaches	Universidad de Cauca, Colombia
2019	Posdoctorado	Marie Sauvadet	Shade trees have higher impact on soil nutrient availability and food web in organic than conventional coffee agroforestry	Eco&Sols, Univ Montpellier, IRD, INRA, Francia
2019	Grado	Juliana Fiallos Rocha	O papel dos sistemas agroflorestais na conservação e restauração de plantas epífitas (orquídeas e bromélias): um estudo com cafeeiro sombreado em Turrialba - Costa Rica	USP, Brasil
2018	Doctorado	Gerardo García Nevárez	Evaluación de la calidad y métodos de producción de Bioplaguicidas para el manejo de <i>Hemileia vastatrix</i> en plantaciones de café	CATIE
2018	Maestría	Víctor Roberto Naranjo Zúñiga	Evaluación del efecto de diferentes manejos de nutrición y sombra sobre la resistencia fisiológica de la planta de café ( <i>Coffea arabica</i> ) a la roya ( <i>Hemileia vastatrix</i> ), en discos de hoja en condiciones controladas de laboratorio	CATIE
2017	Doctorado	Nilovna Chatterjee	Soil carbon sequestration under shaded perennial agroforestry systems for climate change mitigation	University of Florida, USA
2017	Grado	Isabella Quatrochi Soncim	Rentabilidade Económica de Sistemas Agroflorestais con café: estudo de longo prazo em Turrialba, Costa Rica	USP, Brasil
2016	Maestría	Marta Beatriz Segura Escobar	Efectos de la sombra en el cultivo del café sobre los procesos de esporulación, dispersión a través del agua y deposición, de <i>Hemileia vastatrix</i> , en Turrialba, Costa Rica	CATIE
2016	Maestría	Alejandro Brenes Loaiza	Efecto de la sombra y el microclima sobre los procesos de colonización, esporulación y dispersión aérea de la roya ( <i>Hemileia vastatrix</i> ) sobre plantas de café ( <i>Coffea arabica</i> ) en la zona de Turrialba, Costa Rica	CATIE
2016	Grado	Néstor David Lemus Zamudio	Agotamiento en plantas de café en respuestas a poda en diferentes sistemas agroforestales en contraste con producción en pleno sol	UDCA, Colombia
2015	Maestría	Oriana Carolina Ovalle Rivera	Impacto del cambio climático en la productividad del café ( <i>Coffea arabica</i> ) bajo sistemas agroforestales en Costa Rica y Nicaragua	CATIE
2015	Grado	Eduardo Granados Brenes	Evaluación de la incidencia y severidad de <i>Hemileia vastatrix</i> en plantas de café bajo diferentes intensidades de sombra y estrategias de manejo	UCR
2015	Maestría	Maxime Soma	On the relationship between structure and canopy temperature in stands: comparing Shaded and Full-Sun situations in a coffee agroforestry trial in Costa Rica	AgroParisTech, Université de Lorraine, CIRAD, Francia
2014	Posdoctorado	Adam Martin	Causes and consequences of intraspecific trait plasticity of Coffee en agroforestry systems	University of Toronto. Canadá.
2014	Maestría	Stephanie Gagliardi	Intraspecific trait plasticity in coffee agroforestry systems of Costa Rica	University of Toronto. Canadá.
2014	Maestría	Jimmy Trinidad Pico Rosado	Efecto de la sombra del café y el manejo sobre la incidencia, severidad, cantidad de inóculo y dispersión de <i>Hemileia vastatrix</i> en Turrialba, Costa Rica	CATIE
2014	Maestría	Ana Lucía Milagros Vásquez Vela	Valoración comparativa de la macrofauna de lombrices en sistemas agroforestales de café orgánico y convencional en contraste con cultivos en pleno sol y bosque, durante la época lluviosa y seca en Turrialba, Costa Rica	CATIE
2014	Grado (práctica académica)	Isabelle Merle	Efecto de la sombra y del microclima sobre la dispersión de las uredosporas de <i>Hemileia vastatrix</i> en sistemas agroforestales de café ( <i>Coffea arabica</i> var. Caturra) en Turrialba, Costa Rica	ENSAIA, Francia
2013	Maestría	Jake Warner Munroe	Nutrient Availability in the Rhizosphere of Coffee: Shade-Tree and Fertilization Effects	University of Toronto. Canadá.
2012	Doctorado	Martín Raimo Andreas Noponen	Carbon and economic performance of coffee agroforestry systems in Costa Rica and Nicaragua	Bangor University. CATIE
2012	Maestría	Leslie Campbell	Biophysical drives of tree crop performance in shade agroforestry systems: the case of coffee in Costa Rica	University of Toronto. Canadá.
2012	Grado	Litza Tatiana López Díaz	Producción de raíces finas y micorrización en café ( <i>Coffea arabica</i> L) cultivado bajo sistema convencional y orgánico en Turrialba, Costa Rica	UNA, Honduras

Periodo	Nivel	Autor	Título	Institución/universidad
2011	Doctorado	Argenis Mora Garcés	Characterization of the spatial variability of soil properties and coffee fine roots in shade tree-coffee associations under organic and conventional management practices	CATIE
2011	Maestría	Esteban Sánchez González	Efecto de la sombra y del manejo del café sobre la dinámica poblacional de ( <i>Hypothenemus hampei</i> Ferrari) en frutos nuevos y remanentes en Turrialba	CATIE
2011	Maestría	Esteban Rossi	Effects of management practices on coffee productivity and herbaceous species diversity in agroforestry systems in Costa Rica	Yale University,, USA Tropical Resources Institute (tesis corresponde al capítulo 9 del libro Agroforestry as a tool for landscape restoration.)
2011	Maestría	Meredith Cowart	Shade and Management Effects on Soil Carbon Fractions in Organic and Conventional Coffee Agroforestry Systems in Costa Rica	Yale University, USA Tropical Resources Institute
2010	Maestría	Jhenny Liliana Salgado Vásquez	Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua	CATIE
2010	Maestría	Donal Fernando López Bravo	Efecto de la carga fructífera sobre la roya ( <i>Hemileia vastatrix</i> ) del café, bajo condiciones microclimáticas de sol y sombra, en Turrialba, Costa Rica	CATIE (Desarrollado en bordes del Ensayo)
2010	Grado	Pablo Andrés Montenegro Salas	Monitoreo fitosanitario y productivo de sistemas agroforestales en café ( <i>Coffea arabica</i> ) (CR 95, Caturra, F1), Amarillón ( <i>Terminalia amazonia</i> ), Cashá ( <i>Chloroleucon</i> sp.) y Poró ( <i>Erythrina poeppigiana</i> ) bajo manejos convencionales y orgánicos en Turrialba, Costa Rica	Instituto Tecnológico de Costa Rica
2010	Grado	Jennifer Hernández Aguilar	Incidencia de enfermedades foliares del café bajo diversos tipos de sombra y manejo de insumos, en sistemas agroforestales, Turrialba, Costa Rica	Instituto Tecnológico de Costa Rica
2009	Maestría	Sylvie Remal	Conceptual and numerical evaluation of a plot scale, process-based model of coffee agroforestry systms in Central America: CAF2007	Supagro Montpellier. Cirad, Francia
2008	Grado	Yuliney Perdomo Prada	Caracterización de aves, insectos y pequeños mamíferos en el ensayo de sistemas agroforestales en café del CATIE, Turrialba, Costa Rica	Universidad del Tolima. Colombia
2007	Maestría	Marvin Elimelet Merlo Cabellero	Comportamiento productivo del café ( <i>Coffea arabica</i> var Caturra), el poró ( <i>Erythrina poeppigiana</i> ), el amarillón ( <i>Terminalia amazonia</i> ), y el cashá ( <i>Chloroleucon eurycyclum</i> ) en sistemas agroforestales bajo manejos convencionales y orgánicos en Turrialba, Costa Rica	CATIE
2007	Grado	Christian Dold	Musa in shaded perennial crops- responce to light interception.	University of Geisenheim. (Evaluó luz en parcelas del Ensayo)
2006	Maestría	Siyyid Ali Romero López	Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes en seis sistemas agroforestales de café ( <i>Coffea arabica</i> var. Caturra), con tres niveles de manejo	CATIE
2005	Maestría	Allison E. Henderson	Uso del hábitat y comunicación sexual de <i>Exophthalmus jekelianus</i> (White) (Coleoptera: Curculionidae) en cafetales en Costa Rica.	Universidad Simon Fraser, Canadá
2005	Maestría	Edilberto Javier Montenegro Gracia	Efecto del aporte de nutrientes de la biomasa de tres tipos de árboles de sombra en sistemas de manejo de café orgánico y convencional	CATIE
2004	Maestría	John Jairo Zuluaga Peláez	Dinámica de la materia orgánica del suelo en sistemas agroforestales de café con <i>Erythrina poeppigiana</i> (Walpers) O.F. Cook en Costa Rica	CATIE
2003	Grado (práctica académica)	Carlos Alberto Cordero	Estudio de la calidad de café en fruto <i>Coffea arabica</i> var. Caturra bajo diferentes sistemas de manejo orgánicos, convencionales y diferentes árboles de sombra del Ensayo de Sistemas Agroforestales en Café MIP-AF del CATIE cosecha 2002-2003	UCR-Universidad de Costa Rica, Costa Rica
2001	Maestría	Nadieja Barbera Castillo	Diversidad de especies de hormigas en sistemas agroforestales contrastantes de café, en Turrialba, Costa Rica	CATIE

Otro resultado académico relevante, producto de las investigaciones, fue la elaboración y publicación de artículos en revistas científicas importantes a nivel mundial.

Entre 2004 y 2020 se publicaron 23 artículos científicos, con promedio de un artículo por año, los cuales presentaron resultados novedosos sobre los diferentes temas de investigación (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Artículos publicados en revistas científicas en el marco del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica

Año	Autores	Título	Fuente
2020	E. LASSO, D. CORRALES, J. AVELINO, E. DE M. VIRGINIO FILHO, J. CORRALES	Discovering weather periods and crop properties favorable for Coffee rust incidence from feature selection approaches	Computers and Electronics in Agriculture 176(2020) 105640 ELSEVIER
2020	O. VALLE-RIVER, M.VAN OIJEN, P. LÄDERACH, O. ROUPSARD, E. DE M. VIRGINIO FILHO, M. BARRIOS, RAPIDEL, B	Assessing the accuracy and robustness of a process-based model for coffee agroforestry systems in Central America	Agroforestry Systems (2020) <a href="https://doi.org/10.1007/s10457-020-00521-6">https://doi.org/10.1007/s10457-020-00521-6</a>
2019	J. AVELINO, S. VILCHEZ, M.B. SEGURA-ESCOBAR, M.A. BRENES-LOAIZA, E. de M. VIRGINIO FILHO, F. CASANOVES.	Shade tree <i>Chloroleucon eurycyclum</i> promotes coffee leaf rust by reducing uredospore wash-off by rain	Crop Protection 129(2020) 105038 ELSEVIER
2019	I.MERLE, P. TIXIER, E. de. M. VIRGINIO FILHO, C. CILAS, J. AVELINO	Forecast models of coffee leaf rust symptoms and signs based on identified microclimatic combinations in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica	Crop Protection 130(2020) 105046 ELSEVIER
2019	I.MERLE, J. PICO, E. GRANADOS, A. BOUDROT, P. TIXIER, E. de. M. VIRGINIO FILHO, C. CILAS, J. AVELINO	Unraveling the complexity of Coffee leaf rust behavior and development in different <i>Coffea arabica</i> agroecosystems	Phytopathology 110(2020) 418-427 The American Phytopathological Society
2019	N. CHATTERJEE, P.K.R. NAIR, V.D. NAIR, A. BHATTACHARJEE, E. de. M. VIRGINIO FILHO, R. MUSCHLER, M.R.A. NOPONEN	Do Coffee Agroforestry Systems Always Improve Soil Carbon Stocks Deeper in the Soil?—A Case Study from Turrialba, Costa Rica	Forests 2020, 11, 49; doi:10.3390/f11010049 www.mdpi.com/journal/forests
2018	M. SAUVADET, K. VAN DE MEERSCHÉ, C. ALLINNE, F. GAY, E. de M. VIRGINIO FILHO, M. CHAUVAT, T. BECQUER, P. TIXIER, J. HARMAND	Shade trees have higher impact on soil nutrient availability and food web in organic than conventional coffee agroforestry	Science of the Total Environment 649(2019)1065-1074 ELSEVIER
2018	R. VEZY, M. CHRISTINA, O. ROUPSARD, Y. NOUVELLON, R. DUURSMA, B. MEDLYN, M. SOMA, F. CHARBONNIER, C. BLITZ-FRAYRET, J. STAPE, J. LACLAU, E. de M. VIRGINIO FILHO, J. BONNEFOND, B. RAPIDEL, F.C. DO, A. ROCHETEAU, D. PICART, C. BORGONOVO, D. LOUSTAU, G. MAIRE	Measuring and modelling energy partitioning in canopies of varying complexity using MAESPA model	Agricultural and Forest Meteorology 253-254 (2018) 203-217 ELSEVIER
2017	F. SCHNABEL, E. de. M. VIRGINIO FILHO, S. XU, I.D. FISK, O. ROUPSARD, J. HAGGAR	Shade trees: a determinant to the relative success of organic versus conventional coffee production	Agroforestry Systems 92(2018)1535-1549 SPRINGER
2017	M.E. ISAAC, A.R. MARTIN, E. de M. VIRGINIO FILHO, B. RAPIDEL, O. ROUPSARD, K. VAN DEN MEERSCHÉ	Intraspecific trait variation and coordination: root end leaf economics spectra in Coffee across environmental gradients	Frontiers in Plant Science 8(2017) 1-13 doi: 10.3389/fpls.2017.01196
2016	M.T.S. TREVISAN, R.F. ALMEIDA, G. SOTO, E. de M. VIRGINIO FILHO, C.M. ULRICH, R.W. OWEN	Quantitation by HPLC-UV of Mangiferin and Isomangiferin in Coffee ( <i>Coffea arabica</i> ) Leaves from Brazil and Costa Rica After Solvent Extraction and Infusion	Food Anal. Methods DOI 10.1007/s12161-016-0457-y SPRINGER
2016	A. BOUDROT, J. PICO, I. MERLE, E. GRANADOS, S. VILCHEZ, P. TIXIER, E. de. M. VIRGINIO FILHO, F. CASANOVES, A. TAPIA, C. ALLINNE, R. RICE, J. AVELINO	Shade effects on the dispersal of airborne <i>Hemileia vastatrix</i> uredospores	Phytopathology, Ecology and Epidemiology, e-Xtra <a href="http://dx.doi.org/10.1094/PHYTO-02-15-0058-R">http://dx.doi.org/10.1094/PHYTO-02-15-0058-R</a> The American Phytopathological Society
2016	A.R. MARTIN, B. RAPIDEL, O. ROUPSARD, K. VAN DEN MEERSCHÉ, E. de M. VIRGINIO FILHO, M. BARRIOS, M.E. ISAAC	Intraspecific trait variation across multiple scales: the leaf economics spectrum in Coffee	Functional Ecology doi: 10.1111/1365-2435.12790 2016 British Ecological Society
2015	S. GAGLIARDI, A.R. MARTIN, E. de. M. VIRGINIO FILHO, B. RAPIDEL, M.E. ISSAC	Intraspecific leaf economic trait variation partially explains coffee performance across agroforestry management regimes	Agriculture Ecosystems and Environment 200(2015)151-160 ELSEVIER
2015	J.W. MUNROE, G. SOTO, E. de M. VIRGINIO FILHO, M.E. ISAAC	Soil microbial and nutrient properties in the rhizosphere of Coffee under agroforestry management	Applied Soil Ecology 93(2015)40-46 DOI: 10.1016/j.apsoil.2015.04.003 ELSEVIER

Año	Autores	Título	Fuente
2012	M.R.A. NOPONEN, G. EDWARDS-JONES, J.P. HAGGAR, G. SOTO, N. ATTARZADEH, J.R. HEALY	Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management	Agriculture, Ecosystems and Environment 151 (2012) 6– 15. ELSEVIER
2012	A. MORA, J. BEER	Geostatistical modeling of the spatial variability of Coffee fine roots under Erythrina shade trees and contrasting soil management	Agroforestry Systems 87(2013)365-376 SPRINGER
2012	D.F. LOPEZ-BRAVO, E.de.M. VIRGINIO FILHO, J. AVELINO	Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions	Crop Protection 38 (2012)21-29. ELSEVIER
2011	J. HAGGAR, M. BARRIOS, M. BOLAÑOS, M. MERLO, P. MORAGA, R. MUNGUIA, A. PONCE, S. ROMERO, G. SOTO, C. STAVER, E. de. M. VIRGINIO	Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America	Agroforestry Systems 82(2011)285-301 SPRINGER
2008	M.S.F. RICCI, E. de. M. VIRGINIO FILHO, J.R. COSTA	Diversidade da comunidade de plantas invasoras em sistemas agroflorestais com café em Turrialba, Costa Rica	Pesquisa Agropecuaria Brasileira 7(2008)825-834
2008	A.M. AQUINO, E. de. M. VIRGINIO FILHO, M.S.F. RICCI, F. CASANOVES	Populações de minhocas em sistemas agroflorestais com café convencional e orgânico	Cienc. Agrotec. 4(2008)1184-1188
2006	Y. S. LEÓN, E. de. MELO, G. SOTO, J. JOHNSON-MAYNARD, J. LUGO-PÉREZ	Earthworm Populations, Microbial Biomass and Coffee Production in Different Experimental Agroforestry Management Systems in Costa Rica	Caribbean Journal of Science, Vol. 42, No. 3, 397-409, 2006
2004	N. BARBERA, L. HILJE, P. HANSON, J.T. LONGINO, M. CARBALLO, E. de. MELO	Diversidad de especies de hormigas en un gradiente de cafetales orgánicos y convencionales	MIP-CR- 72(2004) 60-71

Además de la producción de tesis y artículos científicos en revistas especializadas, el ensayo ha contribuido con información para la elaboración de publicaciones (22) destinadas a distintos públicos.

#### **d) Resultados generales de estudios realizados**

Uno de los retos más importante para el equipo investigador, frente al amplio conjunto de datos, es poder integrar y sintetizar los resultados obtenidos por los diferentes estudios. Esta tarea será permanente a lo largo de los próximos años considerando el volumen, la riqueza y complejidad de la información disponible. Mientras se desarrollan estrategias y métodos más elaborados de integración y análisis de metadatos, se ha propuesto la elaboración de una matriz comparativa de los resultados de distintas variables para los 20 sistemas en estudio. Para cada grupo de variables se han definido tres niveles de referencia (valores óptimos, intermedios y críticos), según el conocimiento disponible de cada tema. El propósito es acercarse a la posibilidad de integrar y comunicar resultados globales para el conjunto de estudios realizados, sin pretender ser exhaustivo ni incluir un alto nivel de detalle. La matriz presentada (Figura 13) retoma algunos de los principales estudios y tiene carácter preliminar sobre los grandes hallazgos encontrados. Se espera seguir ampliando y mejorando la integración de la información de los resultados generados.

Se confirma que los sistemas de producción de café, con la variedad Caturra, a plena exposición solar en las condiciones de sitio del estudio, tanto con manejo AC como MC, presentan mayor cantidad de valores críticos negativos con relación a diferentes variables biofísicas y servicios ambientales, aunque con valores de productividad y rentabilidad óptimos. Por su parte el SAF con manejo BO establecido con la variedad Caturra, con sombra de maderables (*T. amazonia*), colapsó (tanto en vigor como en productividad) al séptimo año; mientras que las microparcels con Costa Rica 95 e híbridos F1 (L2A11), siguieron siendo sistemas productivos con el mismo manejo (BO).

Particularmente, para los sistemas a pleno sol y en alguna medida con árboles de servicio en manejos AC (poda drástica dos veces al año con alta entrada de luz), los resultados negativos se dieron con las variables de vida del suelo, acidez del suelo, agotamiento de café en los primeros años, temperaturas altas, ausencia de control natural de roya, bajo ciclaje de nutrientes (sólo pleno sol), muy baja captura de carbono (sólo pleno sol), altas emisiones de carbono (menos pleno sol MC) y ausencia de ingresos de diversificación (Cuadro 8, Figura 13).

**Cuadro 8.** Promedio anual de emisiones, captura de carbono y balance neto en los diferentes sistemas del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica, período 2000-2009

Sistemas*	Manejo**	Captura de carbono en biomasa y hojarasca (Mg CO <sub>2</sub> cha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	Emisiones CF <sup>2</sup> (Mg CO <sub>2</sub> cha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> ) (Entre paréntesis orden de menor (1) a mayor (14) emisiones)	Balance anual neto CO <sub>2</sub> (Mg CO <sub>2</sub> cha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )
CE	MC	47,24 (±8,22)	2,95 (9)	44,29 (± 4,7)
CE	MO	47,23 (±7,84)	1,92 (4)	45,31 (±4,5)
TA	AC	45,24 (±5,20)	5,14 (13)	40,10 (±5,2)
TA	MC	25,43 (±6,01)	2,81 (7)	22,63 (±3,5)
EPTA	MC	25,12 (±1,23)	3,20 (10)	21,92 (±0,7)
TA	MO	22,74 (±9,51)	1,72 (3)	21,02 (±5,5)
TA	BO	19,24 (±9,94)	0,50 (1)	18,74 (± 5,7)
EPTA	MO	15,97 (±0,58)	2,29 (5)	13,68 (±0,3)
EP	MC	14,25 (±0,37)	3,77 (11)	10,48 (±0,2)
EP	MO	13,46 (±0,95)	2,92 (8)	10,54 (±0,5)
EP	BO	12,32 (±1,27)	1,50 (2)	10,82 (±0,7)
EP	AC	9,21 (±1,28)	6,13 (14)	3,08 (±0,7)
PSol	AC	4,43 (±0,45)	5,00 (12)	-0,57 (±0,5)
PSol	MC	3,03 (±0,35)	2,71 (6)	0,32 (±0,4)

Fuente: Elaborado con base en Noponen (2012) citado por Virginio Filho *et al.* 2015 (. \*CE= Chloroleucon eurycyclum; EP= Erythrina poeppigiana; TA= Terminalia amazonia; PSol= pleno sol; \*\*MO= manejo orgánico intensivo; AC= manejo alto convencional; MC= manejo moderado convencional



**Figura 11.** Torre de flujo y calicata para evaluación continua de interacciones atmosféricas en sistemas agroforestales y a pleno sol. Fotos: Proyecto MACACC, 2015

Desde el punto de vista del cambio climático y de sistemas mejor adaptados, los diferentes monitoreos y estudios confirman la relevancia de los SAF bien diseñados y manejados para lograr dicha adaptación. Un estudio realizado en el ensayo de SAF café del CATIE, en el marco del proyecto MACACC (Figura 11), confirmó el efecto amortiguador de los SAF para el microclima. Los sistemas con árboles redujeron en promedio la temperatura ambiente dentro del cafetal en 2°C, comparado con los sistemas de pleno sol y de *Erythrina poeppigiana* con poda drástica (Soma 2015).

Por otro lado, además de los efectos negativos de SAF con podas drásticas y el exceso de luz, los sistemas con alta densidad de sombra han afectado negativamente la producción de café y han propiciado condiciones favorables para algunas enfermedades, en especial para la roya. Las limitantes con sombras densas estuvieron vinculadas a la logística y recursos para garantizar el manejo oportuno de los árboles en libre crecimiento, en particular después de los ocho primeros años.

Durante los primeros cinco años se hicieron podas de formación en los árboles maderables, luego, en la fase de mayor desarrollo y crecimiento, se hicieron dos arreglos de copas. En los últimos años se buscó ajustar las entradas de luz en las parcelas con maderables a partir de raleos que redujeron la densidad de árboles por área. Los SAF café con todos los tipos y niveles de manejo (AC, MC, MO, BO) con la presencia de los árboles de servicio (*E. poeppigiana*), han presentado, en general, mejor productividad y servicios ambientales. En particular, durante el período 2010 a 2016, época de fuertes afectaciones de roya, de los cinco sistemas que se mantuvieron con niveles óptimos e intermedios de la enfermedad, tres están asociados con árboles de servicios (Figura 13).

Al comparar entre sí todos los sistemas AC y MC, es evidente que la presencia de árboles, tanto de servicio como maderables, cambian el valor de variables (vida en suelo, acidez del suelo, avifauna, agotamiento de plantas, microclima y captura de carbono), a niveles óptimos e intermedios en comparación con los sistemas de pleno sol (Figura 13).

Cuando se comparan los sistemas con manejo orgánico, los que presentan más valores óptimos e intermedios (macrofauna-catalasa del suelo, fertilidad y reducción de acidez de suelos, biodiversidad y cobertura del suelo, reducción de estrés de plantas, regulación de

microclima, captura de carbono y balance positivo en emisiones, así como productividad de café), son los que tienen árboles maderables (MO) y árboles de servicio (MO). Sin embargo, para el criterio comportamiento de productividad en el período 2010 a 2016 (afectación de roya), el sistema con árboles de servicio (*E. poeppigiana*) (MO), presentó el mejor resultado. El único manejo que colapsó durante las dos primeras décadas fue el sistema con árboles maderables (*T. amazonia*) variedad Caturra, con manejo bajo orgánico (BO); sin embargo, lo interesante es que dentro de los manejos orgánicos el que presentó mejor rentabilidad (relación entre productividad y costo) durante la segunda década de estudio, fue el sistema con árboles de servicio en manejo bajo orgánico (BO), aunque estuvo afectado por el impacto de roya en el período 2010-2016 (Figura 13).

El artículo de Isabella Soncim *et al.* (página 177, esta revista), muestra los resultados del segundo estudio de rentabilidad de los sistemas presentes en el ensayo, luego de transcurridos 16 años, y especifica el desempeño financiero de los diferentes enfoques de producción. Entre los hallazgos más importantes se indica que de 20 sistemas, 19 son rentables y que hay SAF tanto convencionales como orgánicos que se ubican entre los de más alta rentabilidad (*E. poeppigiana* AC, *C. eurycyclum* + *E. poeppigiana* AC, *E. poeppigiana* BO y *E. poeppigiana* + *T. amazonia* MC).

En el marco del ensayo entendemos el concepto de sostenibilidad como el mantenimiento e incremento de la producción, el de sinergismo ecológico como el que propicia resiliencia ante el clima e interacciones positivas entre árboles, niveles y tipos de insumo sobre la base de mejoras (establecimiento y/o regeneración) en la biología y fertilidad del suelo, ciclaje de nutrientes y mayor dinámica en la biodiversidad (Haggard *et al.* 2001). En los 20 años de estudios, los sistemas que más destacaron en sostenibilidad y sinergismo ecológico fueron: SAF con árbol de servicio (*E. poeppigiana*) y manejo intensivo orgánico (MO) y SAF con árbol de servicio (*E. poeppigiana*) y manejo moderado convencional (MC); estos sistemas mantuvieron el equilibrio entre la producción de café y los servicios ambientales. Luego, con muy buenos valores generales, pero con afectaciones productivas posteriores a la epidemia de roya (2012), en el período 2010-2016, están los sistemas maderables con manejo orgánico intensivo (MO) y manejo moderado convencional (MC), y el sistema combinado árboles de servicio más maderable en manejo orgánico intensivo

(MO) (Figura 13). Tanto los SAF maderables, como los SAF *E. poeppigiana* y SAF *E. poeppigiana* más maderables (*C. eurycyclum*) con manejo bajo orgánico (BO), deben seguir siendo valorados con atención a lo largo de los próximos años para poder concluir sobre su capacidad potencial de resiliencia ante los efectos de plagas, enfermedades, clima e interacciones entre componentes del sistema y manejos.

En la Figura 12 se observan las diferentes composiciones y arquitecturas de los sistemas agroforestales con café, que forman parte del ensayo de largo plazo, ubicado en el CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Aunque destaca entre los mejores sistemas, el SAF *E. poeppigiana* con Caturrra con manejo orgánico intensivo, tiene altos costos de manejo, aspecto que constituye una limitante importante para productores de escasos recursos, y una limitante histórica para la implementación de sistemas agroforestales sostenibles (Fournier 1981). La buena noticia es que los sistemas *E. poeppigiana* con Caturrra en manejo bajo orgánico y *E. poeppigiana* más *C. eurycyclum* con manejo bajo orgánico, han tenido buena rentabilidad a un costo de manejo más bajo, así como valores de variables biofísicas buenos asociadas a mejores servicios ambientales (Figura 13).



Sistema de *Erythrina poeppigiana* en manejos AC (poda drástica de árboles dos veces al año)  
(Foto: E. de M. Virginio Filho, 2005)



Sistemas de *Erythrina poeppigiana* en manejos MC, MO, BO (podas reguladas con altura intermedia de árboles dos veces al año)  
(Foto: E. de M. Virginio Filho, 2004)



Sistemas de *Erythrina poeppigiana* (Ep) + *Chloroleucon eurycyclum* en manejos MC, MO, BO. En AC la diferencia es que Ep está con poda drástica  
(Foto: E. de M. Virginio Filho, 2012)



Sistemas de sombra de *Erythrina poeppigiana* + *Terminalia amazonia* en manejos MC, MO  
(Foto: E. de M. Virginio Filho, 2012)



Sistemas *Chloroleucon eurycyclum* + *Terminalia amazonia* en manejos MC y MO  
(Foto: Gabriela. C. Malpeli, 2012)



Sistemas *Terminalia amazonia* en manejos AC, MC, MO y BO  
(Foto: E. de M. Virginio Filho, 2015)



Sistemas *Chloroleucon eurycyclum* en manejos MC y MO  
(Foto: E. de M. Virginio Filho, 2015)

**Figura 12.** Tratamientos agroforestales establecidos como parte del ensayo de largo plazo con café, Turrialba, Costa Rica. Cada una de las fotos detalla el manejo silvicultural aplicado a cada una de las especies arbóreas

Parámetros evaluados/Sistemas	AC				MC				MO			BO			
	SO	SE	MA	SE+ MA	SO	SE	MA	SE+ MA	SE	MA	SE + MA	SE	MA	SE+ MA	
VIDA EN SUELO – MACROFAUNA (2005-2017)	Red	Verde claro	Verde claro	ND	Red	Verde claro	Verde claro	ND	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro	
VIDA EN SUELO- (2020) MICROFAUNA-CATALASA	Red	Red	Verde claro	ND	Red	Verde claro	Verde claro	ND	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro	
FERTILIDAD EN SUELO (2010)	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro								
CARBONO Y ESTRUCTURA DO SOLO (2010)	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	ND	ND								
ACIDEZ DO SOLO (2010)	Red	Red	Verde claro	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro	
DIVERSIDAD DE HIERBAS EN SUELO (2011)	Verde claro	Verde claro	Red	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro	
DIVERSIDAD AVES (2008)	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro	
AGOTAMIENTO CAFÉ (2004)*	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro	
SOMBRA (ENE-JUN 2017)	Red	Red	Verde claro	Red	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Red	Red	Verde claro	Verde claro	Red	Verde claro	
MICROCLIMA (DoseL, Temp)	Red	Red	Verde claro	Verde claro	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro	
INCIDENCE DE ROYA (2017)	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	ND	Verde claro								
CONTROL NATURAL ROYA <i>Lecanicidium l.</i> (2017)	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Verde claro	Verde claro	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Red	ND	
CICLAJE DE NUTRIENTES (BIOMASA AEREA) (2011)	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Red	ND	ND	ND	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	ND	ND	
CAPTURA DE CARBONO (T CO2 e /ha/año) (2000-2009)	Red	Verde claro	Verde claro	ND	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro	
EMISIONES DE CARBONO (T CO2 e /ha/año) (2000-2009)	Red	Red	Red	ND	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro	
PRODUCTIVIDAD MADERA (VT m3 ha) (2007)	Red	Red	Verde claro	Verde claro	Red	Red	Verde claro	Verde claro	Red	Verde claro	Verde claro	Verde claro	Red	Verde claro	
PRODUCTIVIDAD DE CAFÉ (PRIMERA DÉCADA)	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro								
PRODUCTIVIDAD CAFÉ (2010 – 2016)	Verde claro	Verde claro	Red	Red	Verde claro	Verde claro	Red	Red	Verde claro	Red	Red	Red	Red	Red	
RENTABILIDAD 2001-2010 (ORGANICOS SIN PREMIO)	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde claro	Verde claro								
RENTABILIDAD 2000-2016 (ORGANICOS SIN PREMIO)	Verde claro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Red	Verde claro								

**Con variedad Caturra:**

-Los AC-sol y MC-sol han tenido más valores críticos en servicios ambientales y variables biofísicas aunque no así en productividad

-El BO con maderables (*Terminalia a.*) colapsó

-Los árboles de servicio han sido clave para productividad y servicios ambientales (AC, MC, MO y BO)

-LOS SAF *Erythrina p.* en manejos mo y mc son los que lograron mejores equilibrios hasta la fecha, entre productividad y sinergias agroecológicas

**Figura 13.** Resultados comparativos (verde oscuro, valores óptimos; verde claro, valores positivos intermedios; rojo, valores críticos negativos) de variables agroecológicas en sistemas agroforestales de café a pleno sol del ensayo de largo plazo, Turrialba, Costa Rica

Fuente: modificado de Virginio Filho *et al.* 2018.

Notas: 1) Sistemas: AC: Alto Convencional; MC: Moderado Convencional; MO: Orgánico Intensivo; BO: Bajo Orgánico; SO: Pleno Sol; SE:Árbol de servicio- *E. poepiggiana*.;MA: Árbol maderable, *T. amazonia*, *C. eurycyclum*.; ND: No se evaluó.

2) Fuentes: Vida en suelo – Macrofauna (2005 y 2012-Aquino; Vela; Sauvadet *et al.* 2017); Vida en suelo-Microfauna-Catalasa (Bueno *et al.* 2020); Fertilidad del suelo (2006, Soto *et al.*; 2010-Soto); Carbono y estructura do solo (2010- Soto); Acidez do solo (2010 - Soto); Diversidad de hierbas en suelo (2011 – Roci); Diversidad de avifauna (2008-Perdomo); Agotamiento café (2004), Datos campo; sombra (exceso o falta) (ene-jun 2017 – Soncin, Dolenc); Microclima (doseL, amortiguamiento temperatura) M. soma proyecto MACACC, 2015-2016; Incidencia de roya (ene-jun 2017 – Soncin, Dolenc); Control natural roya *Lecanicidium lecani.* (ene-jun 2017 – Soncin, Dolenc); Ciclaje de nutrientes (biomasa de poda y caída natural ) (2011 – Haggat *et al.*); Captura emisiones de carbono (T CO<sub>2</sub> E /ha/año) (Noponen-2000 a 2009; productividad madera (vt m<sup>3</sup> ha) (2007 – Merlo) nula, media, alta; Productividad de café (primera década) (Salgado 2010) <25qq; 25 a 33 qq; >33qq.; Productividad de café (primera década) Salgado, 2010); Productividad café (2010 – 2016) datos de campo; Rentabilidad 2001-2010 sin premio en orgánicos) (Salgado 2010); Rentabilidad 2000-2016 (Soncim *et al.* 2019).

En el ámbito del rendimiento en la producción de café comercial (sin incluir la primera cosecha), para el período de mayor productividad (los primeros 10 años), 14 sistemas mantuvieron promedios superiores a 22 fanegas por hectárea (5500 kg/ha). Para este período los dos sistemas de más alta productividad fueron el del pleno sol-AC (11 027,5 kg/ha), seguido por el SAF Ep-AC (10 130 kg/ha). Luego, en un segundo grupo están los sistemas pleno sol-MC (8937,5 kg/ha) y los SAF CeEp-AC (8817,5 kg/ha), Ta-AC (7775 kg/ha), Ta-MO (6972,5 kg/ha), Ep-MO (6920 kg/ha). El tercer grupo de sistemas presentaron buenos promedios de rendimiento destacándose el EpTa-MC (6540

kg/ha), Ep-BO (6382,5 kg/ha) y Ep-MC (6140 kg/ha). En un cuarto grupo se ubicaron los sistemas de productividad moderada, siendo los SAF Ce-MC (5985 kg/ha), Ce-MO (5760 kg/ha), CeEp-MO (5685 kg/ha) y el Ta-MC (5640 kg/ha). El siguiente grupo estuvo conformado por los dos sistemas de productividad regular, el CeTa-MC (5402,5 kg/ha) y el CeEp-BO (5202,5 kg/ha). Con bajas productividades están el CeEp-MC (4870 kg/ha), EpTa-MO (4865 kg/ha) y el CeTa-MO (4610 kg/ha). En los primeros 10 años un único sistema (Ta-BO) presentó muy baja productividad (2395 kg/ha), incluso colapsando en cuanto a su vigor productivo (Cuadro 9).

**Cuadro 9.** Productividad (fan/ha, kg/ha) promedio histórico de cosechas comerciales de Caturra en los primeros 10 años (período de mayor rendimiento) y promedio acumulado para los 17 años del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica

Sistemas	Productividad promedio de café fruta acumulada a los 10 años			Productividad promedio de café fruta acumulada a los 17 años		
	Fan/ha	Kg/ha	Orden*	Fan/ha	Kg/ha	Orden (*) y diferencia con los primeros 10 años
Ep-AC	40,52	10 130	(2)	36,96	9240	(2) - 3,56
Ep-MC	24,56	6140	(10)	24,10	6025	(7) - 0,46
Ep-MO	27,68	6920	(7)	26,47	6617,5	(5) - 1,21
Ep-BO	25,53	6382,5	(9)	19,48	4870	(9) - 6,05
Ta-AC	31,10	7775	(5)	25,41	6352,5	(6) - 5,69
Ta-MC	22,56	5640	(14)	16,84	4210	(14) - 5,72
Ta-MO	27,89	6972,5	(6)	18,48	4620	(10) - 9,41
Ta-BO	9,58	2395	(20)	5,21	1302,5	(20) - 4,37
Ce-MC	23,94	5985	(11)	17,93	4482,5	(11) - 6,01
Ce-MO	23,04	5760	(12)	16,49	4122,5	(15) - 6,55
CeTa-MC	21,61	5402,5	(15)	17,54	4385	(13) - 4,07
CeTa-MO	18,44	4610	(19)	14,16	3540	(19) - 4,28
EpTa-MC	26,16	6540	(8)	22,15	5537,5	(8) - 4,01
EpTa-MO	19,46	4865	(18)	16,18	4045	(16) - 3,28
CeEp-AC	35,27	8817,5	(4)	27,28	6820	(4) - 7,99
CeEp-MC	19,48	4870	(17)	15,42	3855	(17) - 4,06
CeEp-MO	22,74	5685	(13)	17,76	4440	(12) - 4,98
CeEp-BO	20,81	5202,5	(16)	14,35	3587,5	(18) - 6,46
Pleno Sol-AC	44,11	11 027,5	(1)	42,49	10 622,5	(1) - 1,62
Pleno Sol-MC	35,75	8937,5	(3)	36,10	9025	(3) + 0,35

Notas: Ep (*Erythrina poeppigiana*), Ta (*Terminalia amazonia*), Ce (*Chloroleucon eurycyclum*); AC= manejo alto convencional, MC= manejo moderado convencional, MO= manejo orgánico intensivo, BO= manejo bajo orgánico; \*orden de mayor (1) a menor productividad (20)

Como era esperado, la productividad de los sistemas después de los primeros 10 años en general disminuyó, a excepción del sistema pleno sol-MC que se mantuvo prácticamente igual. Sin embargo, ocho sistemas mantuvieron los rendimientos superiores a 5500 kg/ha (22

fan/ha). El sistema pleno sol-AC (10 622,5 kg/ha) se mantuvo en la categoría de muy alta productividad. El segundo grupo de alta productividad lo conformó en primer lugar el SAF Ep-AC (9240 kg/ha), seguido por el pleno sol-MC (9025 kg/ha), el SAF CeEp-AC

(6820 kg/ha) y por el SAF orgánico Ep-MO (6617,5 kg/ha). En el grupo tres, con buena productividad, estuvieron los SAF Ta-AC y Ep-MC con 6352,5 kg/ha y 6025 kg/ha, respectivamente. Un solo sistema se ubicó en la categoría de productividad moderada, el EpTa-MC (5537,5 kg/ha). El grupo de baja productividad, pasó a tener un mayor número de sistemas (11), en relación a los primeros 10 años, siendo los Ep-BO (4870 kg/ha), Ta-MO (4620 kg/ha), Ce-MC (4482,5 kg/ha), CeEp-MO (4440 kg/ha), CeTa-MC (4385 kg/ha), Ta-MC (4210 kg/ha), Ce-MO (4122,5 kg/ha), EpTa-MO (4045 kg/ha), CeEp-MC (3855 kg/ha), CeEp-BO (3587,5 kg/ha) y el CeTa-MO (3540 kg/ha). En la categoría de muy baja productividad se mantuvo el Ta-BO (1302,5 kg/ha) (Cuadro 9).

Un elemento determinante para la reducción general de productividad en los diferentes sistemas con Caturra, fue el incremento importante del ataque de roya a partir del 2012, con incidencias anuales promedios que variaron entre 10 y 50%. Lo anterior explica el contraste entre las altas productividades logradas en microparcels con variedades mejoradas y con tolerancia/resistencia a la roya (Milenio, Centroamericano y Costa Rica 95) (Cuadro 10), con manejos moderados convencionales y bajo orgánico. Sin embargo, es notable que aun con las fuertes incidencias de roya, los SAF estuvieron representados en el grupo de alta productividad con los sistemas Ep-AC, CeEp-AC y Ep-MO, y en el grupo de buena productividad con el Ta-AC y el Ep-MC.

Como se había propuesto hacia el inicio del ensayo a largo plazo (Soto *et al.* 2006), durante las primeras dos décadas las investigaciones aportaron información relevante y positiva para desarrollar estrategias y diseños tanto de SAF convencionales, con reducción de uso de insumos sintéticos, como de SAF orgánicos de buena productividad y sinergias agroecológicas.

La combinación de variedades mejoradas resistentes y rústicas con árboles de servicio (*E. poeppigiana*), resultó en una muy buena estrategia para integrar el manejo bajo orgánico (Cuadro 10). En este sentido, este es otro resultado relevante que está asociado a la evaluación comparativa del potencial productivo de diferentes variedades de café. Luego de la evaluación de los 17 años se confirmó que, bajo los manejos indicados (MC, BO), tanto los híbridos F1 Centroamericano y Milenio como el Costa Rica 95, superan la variedad Caturra en productividad y rusticidad (Cuadro 10). El híbrido Milenio, con manejo bajo orgánico tuvo la productividad

promedio más alta (17 867,5 kg/ha), seguido por el híbrido Centroamericano en manejo moderado convencional (15 310 kg/ha); ambos resultados son excelentes para los niveles de manejo considerados.

En un segundo grupo con valores muy buenos, se destacaron el Centroamericano en manejo bajo orgánico (11 427,5 kg/ha), el Costa Rica 95 en manejo bajo orgánico en el sitio 3 (11 265 kg/ha) y el Milenio en manejo moderado convencional (10 557,5 kg/ha). El tercer grupo con valores buenos lo integran los sistemas con Costa Rica 95 en manejo moderado convencional sitio 2 (8562,5 kg/ha) y Costa Rica 95 en manejo bajo orgánico sitio 2 (7747,5 kg/ha).

El cuarto grupo con valores regulares (considerando la productividad nacional en Costa Rica), lo conformó el sistema Caturra en manejo moderado convencional sitio 2 (5930 kg/ha); el sistema Caturra en manejo moderado convencional sitio 3 (5770 kg/ha) y el sistema Caturra en manejo bajo orgánico sitio 2 (5435 kg/ha). El sistema con el peor resultado fue el Caturra en manejo bajo orgánico en el sitio 3 (3787,5 kg/ha). Además, la variedad Costa Rica 95 y los híbridos Centroamericano y Milenio, tuvieron mejor adaptabilidad a las condiciones limitantes de sitio y mejor comportamiento frente a enfermedades como la roya (Virginio Filho y Astorga 2015).

En las áreas de bordes de las parcelas experimentales se establecieron parcelas de CR 95 injertado en Nemaya (resistente a nemátodos). Los resultados han sido satisfactorios en términos de producción y adaptabilidad. Esto abre una nueva perspectiva pues se cuenta con información robusta sobre los diseños y manejos de SAF, así como las variedades promisoras que pueden combinarse para garantizar sostenibilidad y sinergias agroecológicas de mayor potencial en la zona.



Parcelas en bordes (primero plano) de la variedad Costa Rica 95 injertado en Nemaya con asocio con poró, 2013. Foto: E. de M. Virginio Filho

**Cuadro 10.** Productividad promedio en café fruta (fan/ha y kg/ha) en parcelas de variedades mejoradas (híbridos Centroamericano y Milenio, Costa Rica 95) vs Caturra bajo dos sistemas agroforestales establecido en Turrialba, Costa Rica

Sombra regulada de poró y manejo moderado convencional Sitio 2																Promedio por variedad *para los dos sitios indistintamente del manejo-fan/ha (kg /ha)		
Años Variedades	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio (**Fan/ha)	Promedio (Kg/ha)	Milenio	
Caturra	19,61	30,97	3,46	25,67	9,08	33,74	27,43	19,93	37,64	5,69	56,69	3,17	35,04	24,01	<b>23,72</b>	<b>5930</b>	Centroamericano	53,475 (13368,75)
CR95	54,07	48,31	18,68	15,29	9,75	8,55	21,52	11,35	35,39	69,98	67,13	24,73	48,85	45,86	<b>34,25</b>	<b>8562,5</b>	Costa Rica 95	39,295 (9823,75)
Centroamericano	101,16	83,52	39,54	30,6	51,16	26,16	53,19	46,39	57,41	82,55	92,82	41,67	60,69	90,51	<b>61,24</b>	<b>15310</b>	<b>Caturra</b>	20,9225 (5230,625)
Sombra regulada de poró y manejo bajo orgánico Sitio 2																Notas: *Densidad de siembra 5000 cafetos/ha. **1 fanega = 250 kg de café fruta.		
Caturra	33,63	19,15	37,51	42,75	10,06	29,82	38,36	20,29	25,82	2,99	23,14	1,14	6,88	12,82	<b>21,74</b>	<b>5435</b>		
CR95	77,82	51,57	36,23	33,95	16,84	16,03	22,65	12,48	18,41	31,34	44,66	12,18	22,23	37,47	<b>30,99</b>	<b>7747,5</b>		
Centroamericano	84,68	87,36	48,47	45,11	47,17	23,5	56,11	14,17	20,59	66,07	79,09	11,28	17,11	39,27	<b>45,71</b>	<b>11427,5</b>		
Sombra regulada de poró y manejo moderado convencional Sitio 3																		
Caturra	16,79	31,75	2,75	34,86	22,76	30,54	31,22	30,35	35,44	10,79	38,35	2,03	30,38	5,07	<b>23,08</b>	<b>5770</b>		
CR95	65,87	75,05	16,68	54,75	49,18	30,3	44,5	36,09	54,55	51,61	67,83	17,75	60,54	31,63	<b>46,88</b>	<b>11720</b>		
Milenio	67,78	83,26	4,65	28,67	65,39	47,19	36,02	25,63	32,34	74,27	52,02	15,58	45,42	13,04	<b>42,23</b>	<b>10557,5</b>		
Sombra regulada de poró y manejo bajo orgánico Sitio 3																		
Caturra	17,89	33,14	13,18	42,00	11,82	22,68	21,56	21,47	19,71	2,61	4,38	0,0	0,7	0,93	<b>15,15</b>	<b>3787,5</b>		
CR95	42,38	92,27	21,57	86,25	41,77	34,13	52,06	29,04	43,49	53,81	42,78	14,29	46,81	30,23	<b>45,06</b>	<b>11265</b>		
Milenio	118,6	121,32	38,55	66,68	87,07	52,79	78,08	56,3	78,99	108,63	78,43	29,15	52,25	33,7	<b>71,47</b>	<b>17867,5</b>		

Fuente: Elaborado con base en la revisión y ajustes de datos del 2004 a 2017

### e) Sinergias con procesos de fortalecimiento de capacidades y socialización de resultados

#### - Apoyo a la formación académica a nivel superior

El ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café en el CATIE, Costa Rica, ha sido un espacio permanente para apoyar y fortalecer los conocimientos y habilidades metodológicas de docentes y estudiantes. Un total de 35 universidades de varios países han participado con pasantías (Cuadro 3) y diferentes estudios de tesis (Cuadro 6). El ensayo ha sido utilizado de manera continua para apoyar el desarrollo de diferentes cursos de varias carreras universitarias entre los cuales se destacan, en Costa Rica, la carrera de salud ambiental y de agronomía, con los cursos de agroecología y ecofisiología de la UCR; la carrera de ingeniería forestal con el curso de agroforestería del Instituto Tecnológico de Costa Rica; la carrera de agronomía con el curso de silvicultura y café de

la Universidad EARTH y la carrera de ingeniería forestal de la Universidad Nacional de Costa Rica. A nivel internacional se han realizado intercambios de estudiantes y profesores de la Universidad de Panamá y de la carrera de agronomía de la Universidad de El Salvador, entre otros.

Igualmente, los estudiantes de diferentes cursos internacionales de corta duración de la escuela de posgrado de CATIE, vinculados a los diferentes programas de maestría y doctorado, se han beneficiado de la realización de sesiones teóricas y prácticas desarrolladas en el ensayo durante los últimos 20 años. Más recientemente el CATIE, y en particular científicos vinculados al ensayo de largo plazo, se han incorporado al programa de la maestría de Ciencia y Tecnología del Café de la Universidad Surcolombiana (USCO), por medio de un convenio que permite el intercambio de experiencias, la enseñanza de posgrado y la investigación.

*- Intercambios y capacitación con personal técnico y productores de café*

Desde su concepción y establecimiento, el ensayo de largo plazo en SAF café de CATIE mantuvo un intercambio constante con personal técnico y productores de los países cafetaleros de América Latina a través de visitas, demostraciones, días de campo y cursos aplicados. Se ha coordinado con PROMECAFE y los institutos de café de los países que participan en el Programa, diferentes intercambios que han fortalecido la promoción de los aprendizajes generados. En varios momentos se ha coordinado con el Instituto de Café de Costa Rica para apoyar intercambios nacionales e internacionales. En los últimos tres años el Proyecto IICA-PROCAGICA-CATIE-UE, ha realizado diferentes intercambios con personal técnico y productores.

Se han realizado una serie de intercambios y eventos de capacitación dirigidos a personal técnico y productores vinculados a cooperativas, asociaciones y empresas de los países productores de café. En promedio se estima que anualmente el ensayo ha sido visitado por unas 250 personas.

El ensayo también ha brindado elementos de apoyo a aprendizajes generados en la red de parcelas con fincas escuelas/demostrativas en el marco de diferentes proyectos. Las fincas de aprendizaje son escenarios de validación de metodologías, de diagnósticos integrales, de innovaciones y prácticas sostenibles y de consolidación de conocimientos sobre interacciones agroecológicas en sistemas agroforestales. Además,

han sido clave en procesos de masificación de prácticas y conocimientos agroecológicos desde diferentes contextos. En general, a partir de la colaboración del ensayo SAF café con diferentes proyectos, institutos de café, instituciones de investigación y asistencia técnica, cooperativas y asociaciones de productores, se estima que los aprendizajes generados han llegado a 42 041 productores (Cuadro 11).

Con el pasar del tiempo y los aportes dinámicos de las diferentes investigaciones, el ensayo posibilitó la indicación de varias prácticas e innovaciones vinculadas con la sostenibilidad y el sinergismo agroecológico. Estas prácticas fueron validadas luego en varias fincas de aprendizaje, con resultados muy satisfactorios. El aprendizaje aplicado, promovido en colaboración con los diferentes proyectos, ha permitido el diseño y desarrollo de programas robustos de implementación interinstitucional para el fortalecimiento de capacidades de decisores, técnicos, familias productoras y empresas (Cuadro 11). Las principales prácticas e innovaciones promovidas están descritas en la Cuadro 12.

Entre 2017 y 2021 el proyecto CATIE-PROCAGICA-IICA-UE, en colaboración con ANACAFE, IHCAFE, INTA, CENTA Café/Consejo Salvadoreño del Café e ICAFE/MAG/Fundacion Café Forestal, ha permitido el desarrollo de estudios aplicados en el ensayo SAF café, y en vínculo directo con una red de fincas de validación en Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica. Lo anterior, ha contribuido a afinar la validación de prácticas en diferentes condiciones agroecológicas.



Viveros para resiembras frecuentes a partir de semillas y plántulas de calidad.



Manejo selectivo de hierbas, uso de guadaña para presionar hierbas competidoras, dejando buenas coberturas naturales.



Manejo integral de la broca del café combinando trampeo y aplicaciones de hongo *Beauveria bassiana*.

Algunas buenas prácticas validadas en ensayo de largo plazo de SAF café, Turrialba, CATIE. Fotos: E. de M. Virginio Filho, E.F. Frade.

**Cuadro 11.** Proyectos con los que el ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café del CATIE, Costa Rica, ha compartido aprendizajes sobre metodologías aplicadas de evaluación agroforestal, interacciones agroecológicas e innovaciones en diseño y manejo de cafetales mediante redes de escuela de campo y procesos de fortalecimiento de capacidades a técnicos y familias productoras

Período	Proyecto/países	N° fincas escuelas/ demostrativas	N° familias capacitadas
2016-2021	Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roca del Café. CATIE-PROCAGICA-IICA-UE Componente de Investigación y Fortalecimiento de Capacidades. Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica	200	6000
2016-2019	“Impulsando la Adaptación en Fincas Cafetaleras de Cooperativas del Café”. Costa Rica. FUNCAFOR-COOCAFE-FUNDECOOPERACIÓN/FONDO DE ADAPTACIÓN. Informe final Validación de prácticas e intercambios. E. de M. Virginio Filho (2019)	24	126
2018-2019	“Programa Nacional de Café”, Bolivia MDRT-INIAF-SENASAG-SEGURIDAD ALIMENTARIA Asesoría para fortalecimiento de capacidades en la cadena del café a entidades nacionales y sub-nacionales-AGRER-AECOM-TRANSTEC	ND€	4956
2014-2016	“Agroforestería sostenible en la Amazonia Ecuatoriana”, Proyecto AFAM-CATIE-INIAP, Ecuador (Virginio Filho y Caicedo 2018)	191	894
2007-2010	“Servicios ambientales y los mercados de café agroforestal en Centroamérica, África del Este y la India”, CAFNET-CIRAD-CATIE-ICRAF-UE. Una de las acciones claves fue compartir con la red de certificadoras internacionales los aprendizajes sobre las interacciones agroecológicas en los primeros 10 años de investigación	74	21 500€
2006-2007	“Plan piloto para la implementación interinstitucional de capacitación aplicada participativa para el mejoramiento de la producción sostenible de café de Bolivia”. CATIE-COOPERACIÓN TÉCNICA BELGA-DED-FECAFE (Virginio, E. de M; Petermann, E. 2007)	68	1558
2005-2007	Implementación participativa para el fortalecimiento de la caficultura en el ámbito del manejo integral de la sub-cuenca del río Jucuapa. (Resultados 2005-2007 GT Café-CATIE-Proyecto CATIE-FOCUENCAS II-ASDI-PCac-UNAG, INTA, UNICAFE, UNAN)	16	216
2003-2005	“Promoción y consolidación de procesos locales participativos y equitativos de transformación de los sistemas de producción cafetaleros hacia la diversificación agroforestal, manejo ambiental limpio y mercados de cafés especiales”. Costa Rica, CATIE-ICAFE-MAG-FUNDECOOPERACIÓN	271	665
2002-2003	“Investigación aplicada y participativa en el manejo integrado de la caficultura bajo énfasis de diversificación y producción de cafés especiales: experiencia piloto de colaboración horizontal. Turrialba, Costa Rica y Tuma, La Dalia, Nicaragua”. Informe técnico final E. de M. Virginio. CATIE-DAAF-ICAFE-APOT-ADDAC-FINNIDA. (2004)	112	14 710
2000-2004	“Manejo integrado de plagas y sistemas agroforestales.” Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, CATIE-MIP-AF/NORAD	721€	10778 <sup>a</sup>
	<b>Totales</b>	<b>1254</b>	<b>42 041</b>

Notas: <sup>a</sup>Número aproximado considerando un total de 8000 familias en Nicaragua, 1881 familias de la zona fronteriza en tres países (Trifinio), 590 en el sur de Honduras y 307 familias en Costa Rica. <sup>b</sup>No incluye Nicaragua que contaba con 500 grupos que conformaban las escuelas de campo. <sup>c</sup> En Nicaragua 10 000 productores atendidos por CAFENICA, COOMPROCOM, CECOCAFEN y la Empresa Atlantic-ECOM; en Costa Rica 8500 productores atendidos por cooperativas afiliadas a COOCAFE, APOT y la empresa FJ Orlich-ECOM; en Guatemala 3000 productores de café atendidos por ANACAFE, ADIPSA, Asociación Albores y Defensores de la Naturaleza. <sup>d</sup> Para la asesoría realizada se trabajó con grupos de técnicos que daban seguimiento a grupos de productores. Fuente: (<sup>a</sup>, <sup>b</sup>) CATIE (2005). (<sup>c</sup>) CATIE-CIRAD-UE (2011)

**Cuadro 12.** Prácticas e innovaciones promotoras de sostenibilidad y sinergismo agroecológico en sistemas de producción de café. Ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica

Prácticas e innovaciones	Descripción
- Diagnósticos prácticos integrales del agroecosistema	- Formatos sencillos para evaluar de manera integrada la relación de diseño y manejo de sombra, plagas/enfermedades, cobertura y vida del suelo, vigor y estado productivo de cafetos. - Método aplicado para evaluación de vulnerabilidad y capacidad adaptativa de cafetales ante el cambio climático integrando el conjunto de variables biofísicas claves.
- Variedades mejoradas de café	- Variedades mejoradas de café con tolerancia/resistencia a la roya, alta productividad y rusticidad en al menos el 50% del área productiva. En las condiciones del ensayo de largo plazo los híbridos Centroamericano, Milenio y Costa Rica 95 (sin y con injerto), tuvieron mejores resultados que la variedad Caturra. En cada país o región hay que valorar la lista de variedades de mayor potencial.
- Manejo integrado básico de cafetales	- Diseño y manejo de cafetales de bajo y moderado costo que integra criterios idóneos de diseño manejo de sombra, manejo de tejido de café, resiembras mínimas, manejo de cobertura del suelo, fertilización y control de plagas y enfermedades.
- Manejo selectivo de buenas hierbas y cobertura del suelo	- Favorecer la presencia de hierbas con buena cobertura (raíces finas, no compite con café, cubre suelo y evita salida de hierbas agresivas, protege suelo) y cobertura de hojarasca en las calles de la plantación (entre filas). Ya sea bajo manejo orgánico o convencional, la estrategia es eliminar las hierbas competidoras y propiciar las hierbas de buena cobertura presentes naturalmente en las calles. En el caso de manejo orgánico, aunque no exclusivamente, el uso de motoguadañas facilita el manejo de las hierbas.
- Aplicación de abonos orgánicos	- La aplicación de abonos orgánicos (en cantidades superiores a 1 kg por planta por año), en especial con aportes complementarios de biomasa de poda de los árboles de servicio. Para resultados con mejores producciones, aunque con mayor costo, se recomiendan cantidades superiores a 2 kg de abono por planta por año, divididas en dos aplicaciones.
- Programas de fertilización convencional de transición	- Balancear aplicaciones de fertilizantes químicos de manera moderada (sin pasar de 200 kg de N/ha/año) con aplicaciones de biomasa de podas anuales de árboles leguminosos. Muy importante incorporar abonos orgánicos.
- Manejo de tejido de cafetos	- Poda selectiva por planta y resiembras anuales de cafetos muertos.
- Diseño de la sombra/ asocio de con los árboles en cafetales	- Sombra temporal para cafetales nuevos en áreas abiertas. - El diseño del asocio de árboles en los cafetales combinando árboles de servicio en mayor cantidad (100 a 200 árboles/ha con manejos anuales de copa), con maderables en cantidades moderadas (60 a 100 árboles/ha cuando los árboles tienen más de 10 años) y frutales leñosos en bajas cantidades (40 a 55 árboles/ha). - Nota: para cafetales sostenibles es fundamental la presencia y manejo de los árboles leguminosos en adecuada densidad y sistema de podas.
- Manejo dinámico de la sombra en asocio con el café	- Arreglos de copa de los árboles de sombra entre 2 y 3 veces al año para incorporar altos volúmenes de biomasa y regular la entra de luz. Los árboles de servicio ( <i>Erythrina</i> sp., <i>Ingas</i> sp., <i>Gliricidia</i> sp., etc.), deben estar a una altura intermedia de 4 a 5 m para facilitar el manejo anual. - El uso de podadoras telescópicas (con y sin motor) son herramientas necesarias para garantizar manejos seguros y oportunos de la sombra.
- Manejo integral/holístico de la broca del café	- Combinación de las siguientes estrategias: cosecha total de frutos, trampas (>20/ha) atrayentes poscosecha y aplicaciones de <i>Beauveria bassiana</i> . entre 80 y 90 días después de cada una de las grandes floraciones.
- Manejo integral/holístico de la roya del café	- Integración de las siguientes estrategias: a) Diagnóstico oportuno en diferentes épocas (vigilar que no pase del 10% de incidencia). b) Sombra con presencia de árboles leguminosos con podas frecuentes (mínimo dos al año) para regulación de entrada de luz y aporte de biomasa verde. Evitar cafetales con sombra superior al 55% y a plena exposición solar. c) Programas de fertilización equilibrados tanto en manejos convencionales como orgánico. d) Controles químicos oportunos (tanto en manejo orgánico como convencional), combinando diferentes productos y cuidados para evitar la contaminación de trabajadores y el ambiente. e) Fincas que no dependan solo de variedades susceptibles y combinen en diferentes lotes variedades resistentes/tolerantes.

### - *Comunicación intercambio de información técnico-científica*

Desde el inicio de los estudios, se establecieron diferentes estrategias de divulgación e intercambio de información generada por el equipo de investigación vinculado al ensayo. La participación en diferentes eventos, nacionales e internacionales, ha sido una constante desde el año 2002. Cada evento representó un espacio importante para compartir los aprendizajes generados; sin embargo, en función de los grandes desafíos experimentados durante los años, dos eventos marcaron momentos importantes. El primero fue el II Encuentro de investigadores en producción orgánica, realizado en Turrialba en el año 2002, donde se presentó por primera vez el ensayo y los grandes retos experimentados en la fase de establecimiento. El segundo evento fue 24ª Conferencia internacional de la ciencia del café (ASIC), realizada en Costa Rica en 2012. En esta conferencia el ensayo tuvo un rol activo tanto en ponencias como en la visita de campo, ocasión donde se hizo una síntesis completa sobre los resultados de los primeros 12 años de estudio. La participación de CATIE y del personal investigador vinculado al ensayo, en colaboración con el ICAFE, posibilitó un importante aporte al comité técnico-científico de la conferencia; al mismo tiempo, amplió la divulgación de los resultados de la primera década de estudios del ensayo.

Toda la información generada en el ensayo es de dominio público y de forma gratuita. La información puede ser obtenida por diferentes vías: a) comunicación directa con el equipo de investigación participante de la plataforma del ensayo; b) página web específica ( <https://www.catie.ac.cr/en-que-trabajamos/agroforesteria/agrocafe/proyectos-agroforesteria/ensayos-saf-con-cafe.html> ); c) Vía la biblioteca Orton (CATIE-IICA).

### **f) Vínculos con la formulación de políticas cafetaleras para el desarrollo sostenible**

Uno de los propósitos de la plataforma de investigación vinculada al ensayo de largo plazo, ha sido aportar a los procesos de promoción de la sostenibilidad y sinergismos agroecológicos en el marco del diseño e implementación de políticas públicas y sectoriales vinculadas a la caficultura. En diferentes países y momentos, el ensayo ha aportado información, estrategias de investigación multidisciplinarias e innovaciones de referencia. En diferentes espacios y en colaboración con PROMECAFE, IICA y CAC, se ha brindado insumos sobre factores ambientales, biofísicos y de manejo vinculados a los diferentes enfoques de producción de café.

Con el ICAFE y los ministerios de agricultura y ambiente de Costa Rica, se ha compartido información para el diseño de los programas piloto de pago por servicios ambientales (PSA) para fincas cafetaleras, así como para el desarrollo de la primera NAMA agrícola del mundo (NAMA-Café Costa Rica). Igualmente, con los institutos de café y otras instituciones, se ha aportado a las políticas para el sector café y en particular a las agendas de investigación, educación y cooperación técnica en todos los países de PROMECAFE, en Ecuador y Bolivia (Cuadro 13).

Cabe destacar que en los últimos tres años el proyecto IICA-PROCAGICA-CATIE-UE, ha posibilitado un flujo constante de información científica generada en el ensayo de sistemas hacia las plataformas nacionales y regionales dedicadas a la investigación, asistencia técnica y fortalecimiento de capacidades establecidas en coordinación de los entes nacionales del sector café y el PROMECAFE a nivel regional.

### **Ampliación de la red de ensayos de largo plazo en SAF**

Cuando el personal científico estableció en el año 2000 los dos experimentos de largo plazo en sistemas agroforestales con café en el CATIE, Turrialba, Costa Rica y en Masatepe, Nicaragua, tenía claro la importancia de promover la multiplicación de experiencias similares en diferentes lugares y países (Haggar *et al.* 2001). El comportamiento de las interacciones agroecológicas y su entendimiento frente a los diversos enfoques y estrategias productivas transformadoras están vinculadas a un complejo de factores que se expresan de manera diversa en diferentes contextos. Luego de 20 años de promoción y colaboración con diferentes grupos, CATIE ha apoyado iniciativas innovadoras de creación de ensayos de largo plazo con sistemas agroforestales. A continuación, se presenta una síntesis de las iniciativas.

#### *-Fazenda da Toca, Itirapina, São Paulo, Brasil*

La Toca es una empresa dedicada a la promoción y producción de productos orgánicos producidos en sistemas agroforestales y con principios agroecológicos. Entre 2016 y 2017 la Toca formalizó un intercambio de experiencias con CATIE, y particularmente con la coordinación del experimento de largo plazo de SAF Café de Turrialba. Aunque parte de la asesoría brindó apoyo a las iniciativas de la empresa para el diseño de posibles negocios de sistemas agroforestales en café, la cooperación tuvo énfasis en contribuir con su personal técnico con el diseño y establecimiento del primer ensayo brasileño de largo plazo en sistemas agroforestales orgánicos con cítricos (Cuadro 14).

**Cuadro 13.** Aportes de la investigación del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café (Turrialba, Costa Rica), a procesos de diseño e implementación de políticas cafetaleras

Instituciones colaboradoras/países	Acciones desarrolladas
PROMECAFE-IICA-CAC (2002 a 2020)	Aporte técnico-científico a la agenda ambiental y de sostenibilidad promovida por el Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura (PROMECAFE e IICA- CAC), que integra 10 países de Mesoamérica y América del Sur. Entre 2017-2020 aportes a la agenda de investigación/validación y desarrollo del Programa CATIE-PROCAGICA-IICA-UE
ICAFE-INTA-MAG-FONAFIFO-CATIE-FUNDACIÓN CAFÉ FORESTAL, Costa Rica	Diseño y desarrollo de propuesta piloto de pago por servicios ambientales para sistemas agroforestales establecidos en cafetales de Costa Rica.
Ministerio de Agricultura y Ganadería, Acuicultura y Pesca (MAGAP-INIAP), Ecuador, (2014-2016)	Mediante intercambios técnico-científicos, desarrollo de investigaciones conjuntas en Costa Rica y Ecuador en el marco del proyecto Agroforestería sostenible en la Amazonia ecuatoriana (Proyecto AFAM-CATIE-INIAP), se consolida la incorporación de la agroforestería con bases científicas en las estrategias del MAGAP e INIAP. Se establece la red de ensayos de largo plazo en café, cacao y naranjilla en la Amazonia ecuatoriana con asesoría de la plataforma de investigadores del ensayo SAF café de Costa Rica
ICAFE-MAG-MINAET-CATIE-CIRAD-FUNDECOOPERACIÓN, Costa Rica	En el marco de las políticas nacionales dadas por la Estrategia de Cambio Climático, Programa País Carbono Neutralidad y el Plan de Acción para el Cambio Climático y la Gestión Agroambiental 2011-2014, se apoyó el diseño de la primera NAMA agrícola del mundo (Acciones Nacionalmente Apropiadas para la Mitigación): NAMA-café Costa Rica (2011)
PROMECAFE- ANACAFE-IHCAFE- ICAFE-PROCAGICA-IICA-UE (2019)	Aporte a la preparación de estrategias regionales en el contexto de cambio climático y café, incluida NAMA-café
MDRT-INIAF-SENASAG-Seguridad Alimentaria AGRER-AECOM-TRANSTEC Bolivia (2018-2019)	A partir de intercambios, pasantías y asesorías con decisores y personal técnico, el ensayo brindó información de apoyo para la implementación del Programa Nacional de Café de Bolivia
ANACAFE-IHCAFE-ICAFE-INTA-FUNCAFOR-CATIE/PRCC/USAID-CATIE-PROCAGICA-IICA-UE (Guatemala, Honduras, Costa Rica, Nicaragua)	Implementación de metodologías para la valoración aplicada de análisis de vulnerabilidad y capacidad adaptativa de fincas cafetaleras ante el cambio climático, incorporadas en programas de implementación de las políticas ambientales de los institutos de café

**Cuadro 14.** Ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con cítricos en la Hacienda de la Toca, Itirapina, São Paulo, Brasil

<b>Período de establecimiento y local</b>	Finales del año 2017 e inicio del 2018 en la Hacienda de la Toca, ubicada en las coordenadas geográficas de 22°13'36.63" S y 47°44'56.02" O, a una altitud aproximada de 800 m, en el municipio de Itirapina, São Paulo, Brasil.
<b>Objetivo general</b>	Evaluar si los cítricos ( <i>Citrus</i> sp.) en los sistemas agroforestales bajo diferentes niveles de sombra, mejoran la calidad del suelo, el desarrollo vegetativo de las plantas, la productividad de las diferentes variedades de cítricos y la calidad de las frutas.
<b>Objetivos específicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluar los atributos químicos (pH, fósforo disponible, cationes intercambiables, acidez potencial, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases, materia orgánica y micronutrientes), físico (granulometría, densidad y porosidad, curva de retención de agua en el suelo, contenido de agua del suelo y resistencia del suelo a la penetración) y <i>stock</i> de carbono del suelo en los diferentes tratamientos.</li> <li>- Evaluar aspectos morfológicos (altura, tallo y diámetro de la corona), y medir la productividad de ocho variedades de cítricos en diferentes tratamientos.</li> <li>- Evaluar los aspectos morfológicos (altura, tallo y diámetro del dosel) de nueve especies de árboles en diferentes tratamientos.</li> <li>- Evaluar los aspectos físicos (longitud y diámetro de la fruta, peso fresco, color de la piel) y químicos (pH, contenido de sólidos solubles, acidez titulable total, ácido ascórbico y actividad antioxidante) de las frutas de las ocho variedades de cítricos en los diferentes tratamientos.</li> </ul>

Fuente: Bezerra (2019)

### Diseño experimental

El experimento se basó en un diseño de bloques al azar, con cuatro tratamientos y tres repeticiones, con un total de 12 parcelas y un área útil de 4960 m<sup>2</sup> cada una y 59 520 m<sup>2</sup> en total. El experimento tiene un área fronteriza de 25 580 m<sup>2</sup>, totalizando 85 100 m<sup>2</sup> (Cuadro 15, Figura 14).

**Cuadro 15.** Descripción del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con cítricos y manejo orgánico, Hacienda de la Toca, São Paulo, Brasil

Área total del ensayo	59 520 m <sup>2</sup> (320 x 186 m) = 5952 ha
Área de parcela	4960 m <sup>2</sup> (62 x 80 m) = 0,496 ha
Repeticiones	3 bloques
Tratamientos	1. Cítricos sin sombra 2. Cítricos SAF con 60% de sombra 3. Cítricos SAF con 80% de sombra 4. Cítricos SAF con 100% de sombra
Manejo	Manejo orgánico intensivo

Fuente: Bezerra (2019)

Las ocho variedades de cítricos estudiadas son: cultivares orange valencian american y ruby orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck), clove tangerine y murcote tangerine (*Citrus reticulata* Blanco), river tangerine (*Citrus deliciosa*), clove lemon (*Citrus bigaradia*), limón siciliano (*Citrus limon*) y caviar de limón (*Citrus australasica*).

El sombreado natural de los cítricos está conformado por un consorcio de especies nativas de árboles maderables: peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*), jequitibá (*Cariniana legalis*), ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*) y louro-pardo (*Cordia trichotoma*) y especies de servicio:

ingá (*Inga edulis*), eritrina (*Erythrina speciosa*) y farinha seca (*Albizia niopoides*), además de especies exóticas como eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) y gliricidia (*Gliricidia sepium*).

El experimento tiene dos años, a través de los cuales las plantas se están desarrollando bien. Hasta el momento, cuenta con una tesis doctoral realizada por la estudiante Leila Pires Bezerra de la Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri)/Unicamp.

Hasta 2019, se han llevado a cabo mediciones trimestrales del crecimiento de las ocho variedades de cítricos y, semestralmente, de las nueve plantas de sombra. También se realizaron análisis químicos, físicos y de carbono de la primera colección de suelo. Los resultados preliminares apuntan a un mayor crecimiento para la mayoría de las variedades de cítricos, en el tratamiento con 80% de sombra.

Se espera que la investigación obtenga información técnica y científica sobre la influencia de diferentes niveles de sombreado natural en el desarrollo y la productividad de ocho variedades de cítricos y la calidad del suelo, contribuyendo a la construcción de una base de datos que pueda probar la viabilidad económica y aspectos sociales y ambientales de los sistemas agroforestales.

-Ensayo en la Estación Central de la Amazonia. INIAP, Ecuador

El Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ha tenido una larga historia de colaboración con el CATIE. En el periodo 2012-2017 se realizaron intercambios y actividades



**Figura 14.** Área experimental que representa los cuatro tratamientos, tres repeticiones y doce parcelas del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con cítricos, Hacienda de la Toca, Itirapina, São Paulo, Brasil. Foto: Google Earth

de colaboración, algunas de las cuales se vincularon a estudios de maestría en el ensayo de sistemas agroforestales con café del CATIE en Costa Rica. En este

marco, también se apoyó al INIAP para establecer tres ensayos de largo plazo con café, cacao y naranjilla en la Amazonia ecuatoriana (cuadros 16, 17 y 18).

**Cuadro 16.** Ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café en la Amazonia ecuatoriana, INIAP, Francisco de Orellana, Ecuador

<b>Período de establecimiento y localización</b>	Finales del año 2015 e inicios del 2016, en la EECA en Joya de los Sachas, provincia Francisco de Orellana
<b>Objetivo general</b>	Evaluar sistemas agroforestales bajo diferentes manejos agronómicos de café robusta ( <i>Coffea canephora</i> ) en la Joya de los Sachas.
<b>Objetivos específicos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Evaluar el efecto de la sombra y el manejo sobre las principales plagas y enfermedades en el cultivo de café robusta.</li> <li>2. Evaluar el efecto de los sistemas agroforestales y diferentes manejos sobre las características físicas, químicas y biológicas del suelo en el cultivo de café robusta.</li> <li>3. Evaluar el comportamiento agronómico de la guaba (<i>Inga spp.</i>) como componente de un sistema agroforestal de café robusta.</li> <li>4. Evaluar el comportamiento de las especies forestales (bálsamo, porotillo – <i>Erythrina spp.</i>) en sistemas agroforestales de café robusta y diferentes manejos agronómicos.</li> <li>5. Estimar el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea del sistema agroforestal de café robusta en cuatro edades diferentes.</li> <li>6. Evaluar el comportamiento productivo y sanitario de nueve materiales genéticos promisorios de café robusta en sistemas agroforestales y dos manejos agronómicos.</li> <li>7. Evaluar la calidad química del mucílago de la especie de café robusta cultivada en dos diferentes sistemas agroforestales. Analizar económicamente los sistemas agroforestales bajo diferentes tipos de manejo agronómico de café robusta.</li> </ol>
<b>Metodología</b>	La investigación se realiza en la Estación Experimental Central de la Amazonía de INIAP, Orellana, Ecuador. El ensayo consta de tres repeticiones bajo un diseño de bloques en parcelas divididas en arreglo de los tratamientos por franjas donde las parcelas grandes corresponden a los tipos de sombra o arreglo forestal y están cruzados por los manejos agronómicos del cultivo de café como parcelas pequeñas. La distribución de los sistemas como de los manejos son al azar. Las unidades experimentales donde se aplican los diferentes manejos bajo cada uno de los arreglos agroforestales propuestos, son parcelas de 12 x 12 árboles con un total de 144 árboles, en los que la parcela neta corresponderá a los 36 árboles centrales (6 x 6). Las variables de respuesta son evaluadas con base en cada objetivo específico: sombra y manejo de plagas; comportamiento de forestales y frutales; adaptabilidad y rendimiento de café; comportamiento de guaba bajo SAF; efecto sobre características físicas y químicas del suelo; características físicas, químicas y funcionales del cacao; y, relación beneficio-coste de los sistemas agroforestales.
<b>Avances y/o resultados</b>	<p>Los avances se resumen en la disponibilidad de bases de datos de acuerdo a los objetivos específicos propuestos; se evidencia in campo cambios del paisaje e incremento de la biodiversidad y ha sido posible realizar varios estudios específicos a nivel de pregrado y postgrado:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. K. Piato (C. Subía, F. Leffort). 2018. The evaluation of agroforestry systems in Robusta coffes plantations in the Amazonian Ecuadorian Region with respect to pests and diseases. Tesis para la obtención de Bachelor of Science HSO-SO en Agronomie.</li> <li>2. Piato, K; Subía, Cristian R; Lefort, F; Calderón, D; Pico, J; Fernández, F. 2018. Determinación de la Sombra en Sistemas Agroforestales de Café <i>Coffea canephora</i> Pierre ex A.Froehner establecidos en la Joya de los Sachas, Provincia de Orellana. Póster 1er Congreso internacional alternativas tecnológicas para la producción agropecuaria sostenible en la Amazonía ecuatoriana. <a href="http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5464">http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5464</a></li> <li>3. K. Piato, 2019. Évaluation de l'effet de systèmes agroforestiers sur le développement de maladies et ravageurs de caféiers robusta en Amazonie équatorienne Piato Kevin. Agroflash. Agronomie hepia mai.</li> <li>4. Piato K; Subía C; Norgrove L; Lefort, F.2019. Evaluation of agroforestry systems in Robusta coffe plantations in the Amazonian Ecuadorian Region with respect to pests and diseases. TROPENTAG 2019. Universities of Kassel and Göttingen, Germany (Póster). September.</li> <li>5. Piato K; Subía C; Norgrove L; Lefort F. Do shade and nutrient management interact and affect pest and disease dynamics in Amazonian Ecuadorian coffee agroforestry systems? Tesis de Maestría Bern University of Applied Sciences.</li> <li>6. Chávez, E; Subía, C. 2020. El manejo de especies de sombra y nutrientes impacta el desempeño del cafeto en las tierras bajas de la Amazonía: una evaluación temprana. INIAP-ESPOL-Universidad de Illinois. Artículo científico, en proceso.</li> </ol>

Fuente: Virgínio Filho y Caicedo 2018.

**Cuadro 17.** Ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con cacao en la Amazonia ecuatoriana, INIAP, Francisco de Orellana, Ecuador

<b>Período de establecimiento y localización</b>	Finales del año 2015 e inicios del 2016, en la EECA en Joya de los Sachas, provincia Francisco de Orellana.
<b>Objetivo general</b>	Evaluar sistemas agroforestales bajo diferentes manejos agronómicos de cacao ( <i>Theobroma cacao</i> ) en la Joya de los Sachas.
<b>Objetivos específicos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Evaluar el efecto de la sombra y el manejo agronómico sobre la producción y las principales plagas y enfermedades en el cultivo de cacao.</li> <li>2. Evaluar el efecto de los sistemas agroforestales y diferentes manejos sobre las características físicas, químicas y biológicas del suelo en el cultivo de cacao.</li> <li>3. Caracterizar y evaluar el comportamiento agronómico del chontaduro (<i>Bactris gasipaes</i>), como componente de un sistema agroforestal de cacao.</li> <li>4. Evaluar el comportamiento de las especies forestales (chuncho -<i>Cedrelinga catenaeformis</i>- y porotillo -<i>Erythrina</i> spp.) en sistemas agroforestales de cacao y diferentes manejos agronómicos.</li> <li>5. Estimar el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea del sistema agroforestal de cacao en cuatro edades diferentes.</li> <li>6. Evaluar el comportamiento productivo y sanitario de nueve materiales genéticos promisorios de cacao en sistemas agroforestales de cacao y dos manejos agronómicos.</li> <li>7. Evaluar la calidad física, química y funcional de los frutos de dos clones de cacao cultivados bajo dos sistemas agroforestales y cuatro manejos.</li> <li>8. Analizar económicamente los sistemas agroforestales bajo diferentes tipos de manejo agronómico de cacao.</li> </ol>
<b>Metodología</b>	La investigación se realiza en la Estación Experimental Central de la Amazonía de INIAP, Orellana, Ecuador. El ensayo se dispone con tres repeticiones bajo un diseño de bloques en parcelas divididas en arreglo de los tratamientos por franjas donde las parcelas grandes corresponden a los tipos de sombra o arreglo forestal y están cruzados por los manejos agronómicos del cultivo de cacao como parcelas pequeñas. La distribución de los sistemas como de los manejos son al azar. Las unidades experimentales donde se aplicarán los diferentes manejos bajo cada uno de los arreglos agroforestales propuestos, son de 12 x 12 árboles con un total de 144 árboles, en los que la parcela neta corresponderá a los 36 árboles centrales (6 x 6). Las variables de respuesta son evaluadas con base en cada objetivo específico: sombra y manejo de plagas; comportamiento de forestales y frutales; adaptabilidad y rendimiento de cacao; comportamiento de chontaduro bajo SAF; efecto sobre características físicas y químicas del suelo; características físicas, químicas y funcionales del cacao; y relación beneficio-coste de los sistemas agroforestales.
<b>Avances y/o resultados</b>	<p>En este ensayo se disponen las bases de datos de acuerdo a los objetivos específicos. Los cambios del paisaje e incremento de la biodiversidad son evidentes, los estudios continúan y/o varios avances han sido presentados en eventos científicos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. C. Subía, C. Caicedo, D. Calderón, L. Tinoco J. Pico, Y. Vargas, F. Fernández, N. Paredes, A. Vera, A. Díaz, S. Bastidas, D. Sotomayor, L. Lima, J. Intriago, C. Congo, M. Sánchez. 2017. Establecimiento de un ensayo en sistemas agroforestales de cacao con diferentes niveles de manejo en la Amazonía ecuatoriana”. Memorias del 2017 International Symposium on Cocoa Research (ISCR) realizado en Lima, Perú. 13-17 de noviembre. Download:ICCO Workshops and Seminars/International Cocoa Research Symposium-Lima, Peru, 2017/Proceedings of the International Symposium on Cocoa Research 2017/Thematic 2</li> <li>2. Tinoco, L.; Díaz, A.; Congo, C.; Vargas, Y.; Caicedo, C. 2019. Eficiencia Energética del cultivo <i>Theobroma cacao</i> en Sistemas Agroforestales Amazónicos del Ecuador. I Simposio Internacional “Innovaciones Tecnológicas para Fortalecer la Cadena de Cacao en la Amazonía ecuatoriana. INIAP-EECA”. Julio.</li> <li>3. Tinoco, L. 2019-2020. Efecto de arreglos agroforestales y niveles de manejo agronómico sobre la incidencia de monilia [<i>Moniliophthora roreri</i> (Cif &amp; Par.) Evans <i>et al.</i>] en el cultivo de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.), en Orellana. Tesis de maestría en desarrollo.</li> </ol>

Fuente: Virginio Filho y Caicedo (2018)

-Ensayo agroforestal basado en *Coffea arabica* var. *Esperanza L4A5* (Universidad EARTH)  
La coordinación del ensayo de largo plazo SAF café de CATIE, ha colaborado en el establecimiento y segui-

miento de una investigación de largo plazo en sistemas agroforestales con café en la región Caribe de Costa Rica, particularmente en las instalaciones de la universidad EARTH (Cuadro 19).

**Cuadro 18.** Ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con naranjilla, en la Amazonia Ecuatoriana, INIAP, Morona Santiago, Palora, Ecuador

<b>Período de establecimiento y localización</b>	Junio del 2014, en la Granja Palora del INIAP
<b>Objetivo general</b>	Evaluar el comportamiento del cultivo de naranjilla ( <i>Solanum quitoense</i> Lam.) bajo sistemas agroforestales (SAF) en callejones con gliricidia ( <i>G. sepium</i> ) y flemingia ( <i>F. macrophylla</i> ) por un periodo de cinco años.
<b>Objetivos específicos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Evaluar los cambios físicos, químicos y biológicos del suelo con cultivo de naranjilla SAF en callejones de flemingia y gliricidia.</li> <li>2. Evaluar el aporte nutricional de la biomasa de flemingia y gliricidia.</li> <li>3. Evaluar la producción del cultivo de la naranjilla en cultivo en callejones vs el cultivo convencional.</li> </ol>
<b>Metodología</b>	La investigación se realiza en la Granja Experimental Palora del INIAP, Morona Santiago, Ecuador. Se aplicó un diseño de bloques al azar con ocho tratamientos, en donde la naranjilla variedad INIAP-Quitoense se combina con flemingia, gliricidia y niveles de fertilización (0,50 y 100%), con tres repeticiones. Se realizarán pruebas de Tukey al 5% los tratamientos y comparaciones ortogonales para tratamientos de omisión de leguminosas y fertilización. Las variables de respuesta son tres agronómicas y tres de propiedades físicas y propiedades químicas.
<b>Avances y/o resultados</b>	<p>Los avances del ensayo agroforestal se presentaron en diferentes eventos de difusión científica y actualmente se sistematiza y analiza la base de datos como tesis de posgrado:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vargas, Y; Nicolade, J; Alcívar, W; Alcívar, E; Sánchez, E; Prado, J; Díaz, A. 2016. Cultivo de naranjilla (<i>Solanum quitoense</i> Lam.) bajo sistema agroforestal tipo callejones con gliricidia (<i>Gliricidia sepium</i>) y flemingia (<i>Flemingia macrophylla</i>). Ficha técnica. Convenio AFAM-CATIE-INIAP. Edición (Elias de Melo Virginio Filho, CATIE, Carlos Astorga, consultor CATIE, Carlos Caicedo, INIAP).</li> <li>2. Vargas, Y; Díaz, A; Nicolalde, J; Pitizaca, G; Alcívar, W; Alcívar, E; Sánchez, E. 2018. Cultivo de naranjilla (<i>Solanum quitoense</i> Lam.) bajo sistema agroforestal tipo callejones con gliricidia (<i>Gliricidia sepium</i>) y flemingia (<i>Flemingia macrophylla</i>). Resumen. 1er Congreso Internacional Ciencia y Tecnología Agropecuaria. Quito, Ecuador.</li> <li>3. Díaz, Alejandra. 2019-2020. Producción sostenible de naranjilla (<i>Solanum quitoense</i> Lam.) variedad iniap quitoense 2009 en sistemas agroforestales tipo callejones on gliricidia (<i>Gliricidia sepium</i>) y flemingia (<i>Flemingia macrophylla</i>) en el cantón Palora, provincia de Morona Santiago. Tesis de Maestría, en proceso.</li> </ol>

Fuente: Virginio Filho y Caicedo (2018)

**Cuadro 19.** Ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café en la región Caribe de Costa Rica

<b>Período de establecimiento y localización</b>	Año 2017, en un área de 0,85 hectáreas de la Universidad EARTH, ubicada entre las coordenadas 10° 12' 24" N y 83° 35' 35" O y a una elevación de 43 msnm
<b>Objetivo general</b>	- Evaluar el crecimiento y la productividad del híbrido <i>Coffea arabica</i> var. Esperanza (L4A5) establecido en suelos de origen aluvial y en relación a la fertilización y a las diferentes asociaciones arbóreas.
<b>Objetivos específicos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Determinar el crecimiento y la productividad del híbrido Esperanza (L4A5) considerando la fertilización y las diferentes asociaciones con árboles</li> <li>2. Determinar la duración de las fases fenológicas del híbrido Esperanza (L4A5) considerando la fertilización y las diferentes asociaciones con árboles</li> <li>3. Comparar la efectividad de los aportes diferenciados de fertilizantes sobre la primera producción de café</li> <li>4. Comparar los diferentes socios de árboles maderables y de servicio con base al crecimiento y la producción de café</li> <li>5. Determinar el efecto de la distancia de los árboles sombra sobre las plantas de café</li> <li>6. Determinar la tolerancia de los híbridos Esperanza (L4A5) a la roya (<i>Hemileia vastatrix</i>) y ojo de gallo (<i>Mycena citricolor</i>)</li> </ol>

Fuente: Morales (2019)

En el marco de una investigación doctoral de la Universidad de Costa Rica, en 2017 se estableció un ensayo agroforestal ubicado en el campus de la universidad EARTH, Costa Rica. Considerando la escasa información existente del híbrido interespecífico *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5 en el contexto de producción agroforestal en zonas de bajura, se diseñó un ensayo que considera las interacciones árboles-café, los aportes diferenciados de nutrientes y las prácticas culturales.

Además de los aspectos de investigación abordados por los objetivos del ensayo (Cuadro 19), también se pretende conocer el potencial de producción para, de esta manera, influir en la activación de proyectos productivos en la región del Caribe costarricense.

En vista de lo anterior, el proyecto de investigación inició considerando tres etapas: a) la adaptabilidad del híbrido al piso altitudinal de bajura (suelos de origen aluvial); b) el establecimiento de las coberturas arbóreas en el contexto del diseño experimental y c) las opciones de manejo adaptadas a las condiciones de la zona. Como pasos previos, se generó información aéreo fotogramétrica y de suelos, las cuales, una vez recopilados, procesados y analizados, dieron paso al establecimiento del ensayo (Figura 15).

Como resultados generales de esta primera etapa, los cafetos registraron una sobrevivencia del 91% y alcanzaron todas las fases fenológicas de forma asincrónica. Aunque la cosecha de café no fue parte de los objetivos iniciales, se lograron beneficiar 110 kilogramos de grano cereza de forma artesanal.

*-Ensayo de largo plazo SAF con cacao, CATIE, Turrialba*

El grupo de investigación de cacao del CATIE, estuvo siempre muy de cerca de las investigaciones desarrolladas en el ensayo de largo plazo de SAF café y, al considerar la relevancia de los enfoques y aportes generados por este ensayo, decidieron iniciar un experimento de SAF largo plazo en cacao. En el Cuadro 20 presenta la información del diseño experimental del ensayo.

*-Ensayo de largo plazo de pasturas, CATIE, Turrialba*

A partir del mes de mayo de 2020, la finca del CATIE dedicada a la producción de leche, en Turrialba, Costa Rica, cuenta con un ensayo de investigación con especies forrajeras a largo plazo. El ensayo con forrajes busca identificar opciones forrajeras para un sistema silvopastoril que mejore la competitividad y la gestión ambiental y climática de fincas dedicadas a la producción de leche, en zonas del trópico bajo de América Latina y el Caribe.



**Figura 15.** Ensayo agroforestal de largo plazo con *Coffea arabica* var. Esperanza (L4A5), EARTH, Guácimo, Costa Rica. Foto: V. H. Morales.

**Cuadro 20.** Ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con cacao, CATIE, Turrialba, Costa Rica

<b>Período de establecimiento y localización</b>	El ensayo se estableció durante el año 2020. Está ubicado en la finca La Montaña, contiguo a la colección internacional de cacao.
<b>Objetivo general</b>	Contribuir con información científica y técnica del desempeño de sistemas agroforestales de cacao orientados a producir altos rendimientos de manera amigable con el ambiente
<b>Objetivos específicos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Evaluar la interacción entre clones promisorios de cacao, tipos de manejo y tipos de sombra en sistemas agroforestales</li> <li>2. Evaluar el efecto de dosis de fertilización química y orgánica sobre la producción de cacao</li> <li>3. Evaluar tipos de poda de cacao sembrado en altas densidades</li> <li>4. Elaborar manuales de enseñanza para técnicos y guías para productores con recomendaciones técnicas derivadas de la investigación.</li> </ol> <p>Las recomendaciones serán una combinación de prácticas para manejar cacao desde su establecimiento hasta su plena producción</p>
<b>Área total del ensayo</b>	El área total del ensayo es de cinco hectáreas aproximadamente
<b>Tratamientos</b>	De acuerdo a los objetivos específicos planteados, el ensayo está compuesto por varios experimentos. El más grande corresponde al objetivo específico 1, que incluye tres factores en estudio y sus interacciones: clones (8), manejo (orgánico y convencional) y tipos de sombra (simple y diversificada). Los otros experimentos ocupan menos áreas con tratamientos puntuales como dosis de fertilización y tipos de poda.

- *El objetivo es identificar sistemas forrajeros que mejoren la competitividad y la gestión ambiental y climática de fincas dedicadas a la producción de leche en zonas del trópico bajo*

El establecimiento del ensayo inició en noviembre de 2018, consta de cuatro hectáreas y tiene cuatro distintos arreglos con las siguientes forrajeras: pasto cayman en monocultivo, pasto cayman en asocio con *Leucaena diversifolia*, pasto cayman en asocio con *Arachis pintoi* y pasto cayman en asocio con *A. pintoi* y *Tithonia diversifolia*. Estos arreglos ya están siendo utilizados en las finca de algunos ganaderos, pero aún no se cuenta con suficiente información productiva, económica y ambiental de los sistemas.

El diseño del ensayo se construyó de forma participativa mediante la alianza Bioersity-CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) y el proyecto Intensificación Sostenible de la Lechería, que en Costa Rica es implementado por el CATIE y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

Cabe destacar que el pasto cayman (un híbrido de *Brachiaria*), el cual se utiliza en los cuatro tratamientos o arreglos del ensayo, es un pasto de la tercera generación desarrollado por CIAT, el cual tolera periodos

cortos de encharcamiento y tiene mayor rendimiento de biomasa y de calidad en comparación con otros pastos de uso tradicional en el trópico bajo.

Tras la fase de establecimiento, se están iniciando distintas investigaciones con estudiantes de posgrado del CATIE y de otros centros educativos, así como con estudiantes de pregrado de otras universidades. Algunos de los temas a estudiar son: costos de establecimiento del sistema silvopastoril con opciones forrajeras; dinámica de los parámetros físicos, químicos y biológicos el suelo; fijación de carbono; disponibilidad y calidad de forraje; producción y calidad de leche; emisión de metano entérico y análisis financieros, entre otros.

## CONCLUSIONES

Como una primera conclusión general, relacionada a la superación de las limitantes durante el establecimiento del ensayo de largo plazo, se establece que hubo estrategias y prácticas efectivas que permitieron la restauración mínima del suelo y viabilizaron la implementación de los complejos protocolos de investigación (Figura 16).

Repasando los grandes objetivos de investigación planteados al inicio y los resultados generales logrados en dos décadas, se puede concluir:

- Los efectos de la composición y el tipo de sistemas evaluados, los tipos y niveles de insumo y variedades sobre el crecimiento y rendimiento del café, la dinámica de plagas y enfermedades, flora y fauna



**Figura 16.** Imagen aérea (dron) de los límites entre el bloque 1 (derecha) y el 2 (izquierda) que ilustra los gradientes microclimático y agroecológico variados producidos en el ensayo de largo plazo de SAF con Café, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Foto: M. Martínez, 2018

(lombrices, aves), así como los ciclos de nutrientes y materia orgánica pudieron ser valorados en el tiempo. Los estudios de calidad de café aportan información sobre variables de rendimiento en el tiempo; sin embargo, hacen falta más evaluaciones sobre calidad organoléptica de los cafés producidos en los diferentes sistemas.

- Se cuantificó el crecimiento y desarrollo de los diferentes estratos arbóreos en términos de acumulación de biomasa, producción de leña, madera y hojarasca y su efecto sobre el microclima, biología del suelo y materia orgánica. Además, se pudo contrastar las interacciones entre sombra, manejo de nutrientes, plagas y variedades en los contextos específicos de suelo, clima y altitud.

El monitoreo constante de variables climáticas ha sido determinante para brindar soporte a los estudios de interacciones entre composición y manejo de los sistemas y cambio climático. Sin embargo, las evaluaciones de microclima cubrieron tiempos específicos de investigaciones especializadas con estudios de tesis y proyectos. Particularmente los aportes inéditos de los estudios microclimáticos realizados por el Proyecto MACACC - COFFEEFLUX entre 2014 y 2017, con apoyo de

torres de flujo, brindaron información relevante sobre la comparación entre sistemas agroforestales entre sí y con el testigo a pleno sol.

Los sistemas productivos de pleno sol (AC, MC), así como los SAF con árboles de servicio (AC, poda drástica de los árboles) con café de la variedad Caturra, aun cuando mantuvieron niveles altos de productividad, impactaron negativamente en las condiciones de acidez y vida del suelo, presentando agotamiento de café en los primeros años, ausencia de control natural de la roya, bajo ciclaje de nutrientes (solo pleno sol), muy baja captura de carbono (solo pleno sol), altas emisiones de carbono (menos pleno sol MC), además de que no contribuyeron a la diversificación de la economía.

El sistema SAF con el maderable (*Terminalia amazonia*, no fijador de nitrógeno, con la variedad Caturra y manejo bajo orgánico (BO), perdió la viabilidad en los primeros 10 años de estudio, pasando a ser una referencia importante a la hora de discutir el diseño y manejo de cafetales con productores de escasos recursos y que optan por la producción orgánica. Este mismo sistema se ha mantenido productivo tanto con la variedad Costa Rica 95 como con el Híbrido F1 (L2A11).

Se ha confirmado que los SAF atenúan las altas temperaturas. Por otro lado, tanto en plena exposición solar como en las sombras densas (>55%), se comprometió el equilibrio entre sanidad, productividad sostenible y vigor de plantación.

La presencia del árbol de servicio *Erythrina poeppigiana*, bajo las composiciones y diseños considerados, ha mejorado el desempeño productivo y los servicios ambientales evaluados para todos los tipos y niveles de manejo (convencionales y orgánicos). En general los SAF, tanto con árboles de servicio como maderables, presentan una mejor valoración en términos de servicios ambientales con respecto a los sistemas en pleno sol.

Los sistemas que más se destacan, al cabo de 20 años, en términos de equilibrio entre productividad y servicios ambientales son: SAF con árbol de servicio (*E. poeppigiana*), manejo intensivo orgánico (MO) y SAF con *E. poeppigiana* en manejo moderado convencional (MC). Los sistemas con *E. poeppigiana* y los de *E. poeppigiana* más *Chloroleucon eurycyclum*, ambos en manejo bajo orgánico (BO), han presentado buena rentabilidad a bajo costo de manejo y buenos valores de servicios ambientales. En síntesis, tanto con manejos orgánicos como con manejos convencionales moderados (reducción de agroquímicos sintéticos), hay propuestas de diseños y manejos prometedores y, en particular, si se combinan con variedades de café mejoradas, las cuales presentan mayor rusticidad, potencial productivo y tolerancia/resistencia a la roya.

- Se ha logrado el desarrollo y promoción de métodos que identifican sinergismos agroecológicos, así como la generación de información sobre sostenibilidad productiva y económica para el cultivo del café. Los estudios apuntan a la necesidad de nuevos temas complementarios de investigación en el campo biofísico, tales como la profundización de los efectos alelopáticos y/o competencia (nutrientes, agua, etc.) de las especies arbóreas, en particular dando énfasis a *Terminalia amazonia*.

En lo que respecta a la rentabilidad de los sistemas en evaluación, las investigaciones realizadas aportan datos y elementos para orientar las estrategias de diseño y manejo de sistemas agroforestales sostenibles y con potencial de restauración del suelo y biodiversidad. Un detalle importante es que los

dos estudios de rentabilidad de los sistemas (2010 y 2017), incluyeron información de ventas de madera y leña generada en aprovechamientos intermedios, sin considerar el valor final de venta de la madera remanente y el sobreprecio que se paga por café orgánico certificado.

- El trabajo colaborativo de la plataforma de investigación con instituciones y proyectos vinculados al ensayo, ha logrado desarrollar y promover enfoques integrados e interdisciplinarios en el estudio de los sistemas de producción y, en particular, los sistemas agroforestales. Lo anterior, constituye uno de los principales logros, como lo fue indicado por Rapidel *et al.* (2015) “...sistemas agroforestales son complejos, y su manejo requiere conocimiento detallado. Por lo tanto, es preciso profundizar la investigación en algunos aspectos claves, así como también aprovechar el conocimiento local de los productores.” Merece destacarse el conjunto de base de datos multi-temas que se ha generado, así como la amplia producción técnica-científica, las sinergias para la aplicabilidad del conocimiento en procesos de fortalecimiento de capacidades y los vínculos con la formulación y promoción de políticas cafetaleras con enfoque de sostenibilidad.

El haber concretado la colaboración y apoyo a otras experiencias de estudio de largo plazo en sistemas agroforestales, como los casos de la Hacienda de la Toca en Brasil, INIAP en la Amazonia ecuatoriana y la EARTH en Costa Rica, constituye un aporte a destacar para el fortalecimiento de la ciencia agroforestal. Sin embargo, sigue siendo fundamental ampliar el número de plataformas de investigación científica con base en ensayos de largo plazo en sistemas agroforestales tanto con café como con otros cultivos.

Dado el carácter preliminar de los esfuerzos de integración y análisis de los resultados del conjunto amplio de estudios realizados en el ensayo de CATIE, se recomienda que a futuro se sigan fortaleciendo y ampliando los esfuerzos de síntesis de información.

Ha sido un reto haber llegado a la meta de los 20 años de estudio; sin embargo, las particularidades de la dinámica de los sistemas investigados, la necesidad de seguir profundizando los hallazgos de manera integral, los nuevos temas de investigación

ya formulados, la riqueza de información generada y las necesidades permanentes de un trabajo colaborativo con el sector cafetalero, justifican el esfuerzo de ampliación del plazo final previsto del ensayo de largo plazo. En este sentido, se renueva la necesidad crucial de garantizar el apoyo en términos de recursos y equipo humano para seguir aprovechando el potencial de la plataforma desarrollada.

### RECOMENDACIONES

Considerado la importancia de la información microclimática y su vínculo con la fisiología de cultivo café, sería oportuno dar continuidad a estudios del mismo perfil, ya sea mediante estudios de tesis o en proyectos de investigación específicos. Al inicio se pensaba contar también con ensayos en zonas altas en diferentes países, se plantearon hipótesis sobre la influencia de la altitud y los SAF café; sin embargo, sigue pendiente el poder contar con experimentos de largo plazo en zonas de mayor altitud.

Considerando el valor científico de las interacciones agroecológicas en estudio, el potencial productivo de la mayoría de los sistemas en campo, y el hecho de que el ciclo final ideal para aprovechamiento de la madera en los SAF podría estar entre 25 y 30 años, se recomienda dar continuidad a las gestiones que permitan mantener el ensayo de largo plazo por mucho más tiempo.

### AGRADECIMIENTOS

El personal científico encargado de la conducción del ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales con café, ubicado en CATIE, Turrialba, reconoce y agradece el apoyo brindado por muchas personas que directa e indirectamente han posibilitado los logros alcanzados. La lista es muy amplia y, aun asumiendo el riesgo de haber olvidado involuntariamente con el tiempo a alguien, queremos destacar una lista de personas colaboradoras que hicieron posible estos 20 años de aporte a la ciencia, la caficultura y la construcción de un mundo ambiental y socialmente mejor. Nuestros más sinceros agradecimientos a:

- Personal que apoyó la fase de establecimiento del ensayo de largo plazo: Pedro Ferreira, Director general de CATIE; comité técnico-científico directivo (Charles Staver, Jeremy Hagggar, Elias de Melo Virginio Filho, Amilcar Aguilar), comité técnico-científico asesor (John Beer, Phillipe Vaast, Jean Michel Harmand, Eduardo Somarriba, Vera

Sánchez, Luko Hilje, Herve Etienne, Reinhold Muschler, Francisco Jiménez, Ulrike Krauss), personal técnico-científico colaborador (Donald Kass, Andrea Schlonvoigt, Muhammad Ibrahim, Luis Meléndez, Markku Kanninen, Benoit Bertrand, Francisco Mesén, Florencia Montagnini, Carola Scholz, Rodolfo Salazar, Carlos Navarro, y los técnicos de la oficina de ICAFE-Turrialba (Luis Guillermo Ramírez, Martín Hidalgo, Juan Carlos Araya Vega y Carlos Cordero), así como a la misión de especialistas nacionales de ICAFE de junio 2003, Carlos Fonseca, Eliécer Campos, Víctor Chaves, Olger Borbón por los importantes aportes a los protocolos de manejo. A Leslie Cooperband (University of Wisconsin), Martha Rosemeyer (University of Wisconsin), a docentes/investigadores de la UCR (Ana C. Tapia, Lolita Durán, Werner Rodríguez, Renán Agüero), personal administrativo (Rodolfo Arguedas, Luis Enrique Ortiz, Antonio Salas), asistentes de campo (Paulo Dittel, Alexis Pérez, Mario Cervantes, Manrique González, Walter Ramírez), asistente del campo responsable de plan de manejo (Luis Fernando Romero), personal de administración de la finca de CATIE (Manuel Gómez Méndez, Alberto Vargas), apoyo secretarial (Celia López, Lorena Jiménez, Patricia Aguilar), personal de campo (Carlos Martínez, José Luna, Ricardo Molina, Minor Torres, Greivin Nuñez, Jorge Fuentes, Rodney Alvarez, Henri Rodríguez, Victorino Loaiza, Enrique Flores, Luis Araya, José Camacho, José Calvo, Rafael Ángel Rodríguez, Carlos Avendaño, Franklin Moya, Sergio Nuñez, Alfonso Arroyo, Bernardo Pereira, Elvis Pereira, Simón Solís (ACSAF), José Ángel Quirós (ACSAF), Joaquín Soto (ACSAF), Marvin Saborío (ACSAF), Francisco Núñez (ACSAF), William Cordero, viverista (Carlos Castro), operador de maquinaria para drenaje Eval Brenes.

- Personal vinculado a la fase de desarrollo de la plataforma: los directores generales de CATIE (José Joaquín Campos, Muhammad Imbrahim); personal administrativo (Margarita Alvarado, Jazmín Salazar) y secretarial (Rebeca Madriz), Heiner Arce Rodríguez (administrador de la finca de CATIE 2005-2007), Alejandro Molina C. (administrador de la finca de CATIE, actualmente), al personal del laboratorio de suelos (Patricia Leandro Montoya y Carlos Fernández Gutiérrez), los asistentes de campo Hugo Méndez y Alejandra Barquero.

- Equipo de bioestadística: Fernando Casanoves, Sergio Vílchez, Eduardo Corrales.
- Personal de seguridad (**equipo inicial:** Jesús Mata Soto (jefe de seguridad), Alfonso Rivera Madriz, Alexander Hernández Sánchez, José Salguero Umaña, Juan Carlos Molina Madriz, Octavio Torres Solano, Danny Cambroner Molina, Gustavo Zamora Porrás, Luis Mora, José Ángel Segura Cascante, Humberto Valverde Leandro, Luis Carlos Navarro Fuentes, Erick Camacho Álvarez; **equipo actual:** José A Barboza Aguilar, jefe de seguridad, Greivin Vives Chávez, Marcos Navarro Mora, Yasniel Calderón Coto, Oscar Bogarín Gutiérrez, Adrián Vásquez Barquero, Ronald Pereira Moya, Rigoberto Vargas Quirós, Gabriel Cordero Fernández, Álvaro Durán Mena, Héctor Araya Martínez, Alberto Marín Acuña, Marvin Molina Cervantes, Martín Sánchez Montoya, Warner Calvo Sánchez, Oscar Fabián Rivera Romero y Martín Flores Brenes).
- Las empresas cafetaleras Beneficio San Rosa, Aquiares y Hacienda Juan Viñas por los apoyos logísticos de gestión y manejo, así como por el intercambio de experiencias.

## BIBLIOGRAFÍA

- Altieri, MA. 2001. Comentarios sobre el ensayo de sistemas agroforestales con café. Informe de visita de campo, 13 de septiembre de 2001.
- Aquino, AM; Virginio Filho, E de M; Ricci, MSF; Casanoves, F. 2008. Populações de minhocas em sistemas agroflorestais com café convencional e orgânico. *Cienc. Agrotec.* 4(2008):1184-1188.
- Bezerra, LP. 2019. Avaliação de Citrus sp em sistemas agroflorestais. Projeto de pesquisa de doutorado. Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI)/UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 2005. Regional program on ecologically based participatory implementation of integrated pest management and Coffee agroforestry in Nicaragua and Central América-(CAM-007). Final report on results and impacts -1998-2004. 130 p.
- CATIE - CIRAD - UE (Centro Agronómico Tropical de investigación y Enseñanza) - (Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo) - (Unión Europea). 2011. Conectando y sosteniendo los servicios ambientales y de mercados para café agroforestal en Centroamérica (Costa Rica, Guatemala y Nicaragua). Informe final enero 2007 a junio 2011. Turrialba, Costa Rica. 96 p.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2003 Istmo centroamericano: evolución del sector agropecuario, 2001-2002. Ciudad de México, México. 24 p.
- Dolenc, G. 2017. Relatorio de Intercambio-Estágio. USP-ESALQ. 23 p.
- Fournier, LA. 1981. Importancia de los sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agronom. Costarr.* 5(1/2):141-147.
- Haggar, J; Staver, C; Virginio Filho, E. de M. 2001. Sostenibilidad y sinergismo en sistemas agroforestales con café: estudio de interacciones entre plagas, fertilidad del suelo y árboles de sombra. *Agroforestería en las Américas* 8-29:49-51.
- Haggar, J; Barrios, M; Bolaños, M; Merlo, M; Moraga, P; Munguia, R; Ponce, A; Romero, S; Soto, G; Staver, C; Virginio, E. de M. 2011. Coffee agroecosystem performance under full Sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agroforest Syst.* 82:285-301.
- ICAPE (Instituto del Café, Costa Rica). (1998. Manual de recomendaciones para el cultivo del café. 1ªEd. Heredia, Costa Rica, ICAFE-CICAPE. 193 p.
- López, L. B; Virginio Filho, E. de M; Vela, A.V; Casanoves, F. (2020) Actividad biológica de suelo: indicadores para el diseño y manejo de sistemas agroforestales con café. (Artículo en fase de publicación)
- McDaniel, P; Kass, D. 2001. Soil descriptions and classification. Turrialba, Costa Rica, (Report).
- Merlo, M. 2007. Comportamiento productivo de café (*Coffea arabica* var Caturra), el poró (*Erythrina poeppigiana*), el amarillón (*Terminalia amazonia*) y el cashá (*Chloroleucon eurycyclum*) en sistemas agroforestales bajo manejos convencionales y orgánicos en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 92 p.
- Morales, VH. 2019. Crecimiento y productividad de *Coffea arabica* var. Esperanza ((L4A5) asociada a tres especies forestales con aportes diferenciados de fertilizantes en suelos de origen aluvial del Bosque muy Húmedo Tropical de la región Caribe de Costa Rica. Anteproyecto de tesis de Doctorado en Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 30 p.
- Noponen, MR. 2012. Carbon and economic performance of coffee agroforestry systems in Costa Rica and Nicaragua. Ph. D. Thesis. Turrialba, Costa Rica, Bangor University y CATIE. 191 p.
- OIC (Organización Internacional del café). 2002. La crisis mundial del café: una amenaza al desarrollo sostenible. s. l. 5 p. Disponible en <http://www.ico.org/documents/globalcrisisc.pdf>
- Perdono, Y. 2008. Caracterización de aves, insectos y pequeños mamíferos en el ensayo de sistemas agroforestales en café del CATIE, Turrialba, Costa Rica. Tesis de grado. Tolima, Colombia, Universidad del Tolima. 72 p.
- Rapidel, B; Allinne, C; Cerdán, C; Meylan, L; Virginio Filho, E. de M; Avelino, J. 2015. Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales. In Montagnini, F; Somarriba, E; Murgueitio, E; Fassola, H; Eibl, B (eds.). *Sistemas agroforestales: Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales.* Cali, Colombia, CIPAV; Turrialba, Costa Rica, CATIE. (Serie técnica. Informe técnico n° 402). p. 5-19.
- Rossi, E; Montagnini, F; Virginio Filho, E. de M. 2011. Effects of management practices on Coffee Productivity and Herbaceous Species Diversity in Agroforestry Systems in Costa Rica. In Montagnini, F; Francesconi, W. Rossi, E (eds). *Agroforestry as a tool for Landscape restoration.* New York, United States of America, Nova Science Publishes. p. 115-132).
- Salgado, J L. 2010. Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 109 p.
- Sauvadet, M; den Meersche, K.V; Allinne, C; Gay, F; Virginio Filho, E. de M; Chauvat, M; Becquer, T; Tixier, P; Harmand, J-M.

2018. Shade tree species impacts on soil fauna And C, N, P cycles in Costa Rica organic and conventional Coffee agroforestry systems. 20th Nitrogen Workshop, Rennes (France), June 25-27th 2018.
- Soma, M. 2015. On the relationship between structure and canopy temperature in stands: comparing Shaded and Full-Sun situations in a coffee agroforestry trial in Costa Rica. Tesis Mag. Sc. AgroParis Tech, Francia, Univeristé de Lorraine.
- Soncim, I; Virgínio Filho, E de M; Righi, C; Shiota, R. 2019. Rentabilidad económica de sistemas agroforestales con café: estudio de largo plazo en Turrialba, Costa Rica. XXIV Simposio Latinoamericano de Caficultura, Guatemala, septiembre (2019) 17-28.
- Soncim, I. 2017. Relatorio de Intercambio-Estágio. Ciudad, País, USP-ESALQ. 23 p.
- Soto, G; García, L; Munguía, R; Hagggar, J; de Melo, E; Barrios, M; Staver, C; Frey, S. 2010. Impact Of conventional and organic coffee agroforestry systems on soil characteristics in an Andisol in Masatepe, Nicaragua and an Ultisol in Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. CATIE-UNA-Bioiversity-University of New Hampshire.
- Soto, G; García, L; Hagggar, J; de Melo, E; Munguía, R; Staver, C. 2006. Efecto del sistema de manejo del café (*Coffea arabica*), orgánico y convencional, con diferentes árboles de sombra sobre las características del suelo en un andisol en Nicaragua y un ultisol en Costa Rica. Boletín PROMECAFE-IICA 108(2006)7-13.
- Vela, ALV. 2014. Valoración comparativa de la macrofauna de lombrices en sistemas agroforestales de café orgánico y convencional en contraste con cultivos en pleno sol y bosque, durante la época lluviosa y seca en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 85 p.
- Virgínio Filho, E. de M. 2019. Impulsando la Adaptación en Fincas Cafetaleras de Cooperativas del Consorcio COOCAFE. Costa Rica. FUNCAFOR-COOCAFE-FUNDECOOPERACIÓN/FONDO DE ADAPTACIÓN. Informe Final Validación de Prácticas e Intercambios. (2019) 126 p.
- Virgínio Filho, E de M; Caicedo, C. 2018. Agroforestería sostenible en la Amazonia ecuatoriana, Proyecto AFAM-CATIE-INIAP: 2014-2015. *In: Agroforestería Sostenible en la Amazonia Ecuatoriana*, N°2: Fragilidad de los suelos en la Amazonia ecuatoriana y potenciales Alternativas agroforestales para el manejo sostenible. Editores (E. de M. Virgínio Filho, C. Astorga, F. Casasola, C. Caicedo) Publicación Miscelánea N° 445, CATIE. (2018) 12-21.
- Virgínio Filho, E de M; Casanoves, F; Rounsard, O; Avelino, J; Hagggar, J. 2018. Promoción, diseño y manejo de sistemas agroforestales con café en tiempos de cambio climático. II Encuentro Nacional Agroforestal, Panajachel, Guatemala, 22 a 24 marzo, 2018.
- Virgínio Filho, E de M; Casanoves, F; Hagggar, J; Staver, C; Soto, G; Avelino, J; Tapia, A; Merlo, M; Salgado, J; Noponen, M; Perdomo, Y; Vásquez, A. 2015. La productividad útil, la materia orgánica y el suelo en los primeros 10 años de edad en los sistemas de producción de café a pleno sol y bajo varios tipos de sombra y niveles de insumos orgánicos y convencionales en Costa Rica. *In Montaginini, F; Somarriba, E; Murgueitio, E; Fassola, H; Eibl, B. Sistemas agroforestales: Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales.* Cali, Colombia, CIPAV; Turrialba, Costa Rica, CATIE. (Serie técnica. Informe técnico n° 402). p. 130-151 p.
- Virgínio Filho, E de M; Astorga, C. 2015 Prevención y control de la roya del café: manual de buenas prácticas para técnicos y facilitadores. Turrialba, Costa Rica, CATIE. (Serie técnica. Manual técnico, n° 131). 96 p.
- Virgínio Filho, E de M; Petermann, E. 2007. Plan piloto para la implementación interinstitucional de capacitación aplicada participativa para el mejoramiento de la producción sostenible de café de Bolivia. Informe Final. CATIE-COOPERACIÓN TÉCNICA BELGA-DED-FECAFE. 71 p.
- Virgínio Filho, E de M. 2004. Investigación aplicada y participativa en el manejo integrado de la caficultura bajo énfasis de diversificación y producción de cafés especiales: experiencia piloto de colaboración horizontal. Turrialba, Costa Rica y Tuma, La Dalia, Nicaragua. Informe técnico final. CATIE-DAAF-ICAFE-APOT-ADDAC-FINNIDA. (2004) 11 p.
- Virgínio Filho, E de M; Hagggar, JP; Staver, CP. 2002. Avances y desafíos en el establecimiento de ensayo de largo plazo en sistemas agroforestales en café zona baja húmeda, Turrialba, Costa Rica. *In memorias II Encuentro de Investigadores en Producción Orgánica*, CATIE, Turrialba, 12 y 13 de marzo, 2002.