

# Efecto de la riqueza de las especies cultivadas en la sustentabilidad de los sistemas agroforestales en la amazonia sur del Perú

J. Peña<sup>1\*</sup>, J. Alegre<sup>2</sup>, R. Bardales<sup>3</sup>

(1) Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Jr. Jorge Chávez N° 1160 - Puerto Maldonado- Perú.

(2) Departamento de suelos Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Agraria la Molina, Apartado Postal 456, Lima, 12, Perú.

(3) Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana, Apartado Postal 17001, Puerto Maldonado, Perú.

\*Autor de correspondencia: J. Peña [[nuevojoel@yahoo.es](mailto:nuevojoel@yahoo.es)].

> Recibido el 01 de noviembre de 2017 - Aceptado el 19 de abril de 2018

**Peña, J., Alegre, J., Bardales, R. 2018. Efecto de la riqueza de las especies cultivadas en la sustentabilidad de los sistemas agroforestales en la amazonia sur del Perú. *Ecosistemas* 27(3):87-95. Doi.: 10.7818/ECOS.1522**

Este estudio se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de la riqueza de las especies vegetales cultivadas en la sustentabilidad de los sistemas agroforestales en la amazonia sur del Perú. De una población de 150 productores se evaluó una muestra de 50, levantándose información de 82 variables a través de encuestas estructuradas, observaciones de campo y toma de muestras de los agroecosistemas. Se agruparon cinco diferentes tipos de sistemas de producción agroforestal y para la evaluación de sustentabilidad se elaboraron indicadores económicos, ecológicos y socioculturales. Se efectuó un análisis de correlación entre los índices de sustentabilidad calculado y la cantidad de especies vegetales cultivadas de las parcelas.

Se encontró que el sistema agroforestal V con 7.5 años y con una combinación de 3 especies de cultivos perennes y 6 especies forestales y una palmera no es sustentable debido a que su indicador económico es inferior a 2, y los sistemas agroforestales I, II, III y IV resultaron ser sustentables porque tienen más de 10 años en producción y mayor diversificación de especies.

Existe un impacto directo y positivo por efecto de la cantidad de especies vegetales cultivadas en los agroecosistemas sobre su sustentabilidad, siendo mayor este índice en las parcelas con más especies vegetales.

**Palabras clave:** agroforestería; agroecosistemas; diversidad; indicadores de sustentabilidad; macrofauna

**Peña, J., Alegre, J., Bardales, R. 2018. Effects of cultivated richness on the sustainability of agroforestry systems in the south Peruvian Amazon. *Ecosistemas* 27(3):87-95. Doi.: 10.7818/ECOS.1522**

The objective of this study was to evaluate the effect of cultivated plant-forest species richness on the sustainability of agroforestry systems in the south Peruvian amazon. From a population of 150 producers we selected 50 and recorded information of 82 variables through surveys with structured questionnaire, field observations and field sample collection in the agroforestry sites. We grouped together five different types of agroforestry systems and evaluated their sustainability by elaborating economic, ecological and sociocultural indicators. Results were analyzed with correlations across the calculated sustainability indexes and the quantity of plant species cultivated in the sites.

We found that the economic indicator of the V agroforestry system of 7.5 years with a combination of 3 perennial crops, 6 forestry species and one palm was not sustainable because was below two and the systems I, II, III and IV were sustainable due to more than 10 years of production and more diversity of plant species.

There was a direct and positive impact on the sustainability of agroforestry systems based on the quantity of cultivated plant species, in which there were higher indexes in the sites with more plant species.

**Key words:** agroforestry; agroecosystems; diversity; macro fauna; sustainability indicators

## Introducción

La Agroforestería es una actividad que se desarrolla en la Amazonia sur del Perú en el departamento de Madre de Dios, como un modelo alternativo al monocultivo y a la deforestación de los bosques amazónicos que es cada vez más intensa (INPE-PRODES 2010), la misma que tiene muchos orígenes como la construcción de carreteras, extracción de madera, ganadería y producción agraria (Le Tourneau 2004). Esta actividad agroforestal ha sido promovida por algunas ONGs y algunos proyectos estatales y que han

obtenido inicialmente buenos resultados, pero sin embargo poco se conoce sobre la sustentabilidad de estos sistemas y la diversidad de sistemas agroforestales (SAFs) establecidos en la región. Los árboles de los SAFs pueden mejorar la productividad del agroecosistema, al influir en las características del suelo, del microclima que es favorable y es fuente de energía y nutrientes para la microfauna (Lavelle et al. 2003; Velásquez 2004; Huerta y Wal 2012) y en los procesos hidrológicos y de otros componentes biológicos asociados (Farrell y Altieri 1999). Además puede reducir el incremento de la fragmentación de los bosques (Ferraz et al. 2005) que

está produciendo efectos negativos en la biodiversidad de los ecosistemas (Laurance et al. 2001).

La sustentabilidad de la agricultura puede ser definida como la capacidad de un agroecosistema de mantener la calidad y cantidad de los recursos naturales a medio y largo plazo, conciliando la productividad agrícola con la reducción de los impactos al medio ambiente y atendiendo a las necesidades sociales y económicas de las comunidades rurales (Brown et al. 1987). Desde el punto de vista económico, los agroecosistemas sostenibles son aquellos que presentan una producción rentable y estable a lo largo del tiempo, haciendo el uso eficiente de los recursos naturales y económicos (Maser et al. 1999; Rigby y Cáceres 2001). Estos agroecosistemas deben ser robustos para enfrentar choques y dificultades socioeconómicas y ambientales, adaptables a estos cambios, así como ser capaces de recuperarse de estos, manteniendo su productividad (Maser et al. 1999).

Para evaluar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, muchos autores (Sarandón et al. 2006; Sarandón y Flores 2009) desarrollaron una metodología que tiene una serie de pasos que permiten obtener los indicadores económico, ecológico y sociocultural, que sirven para calcular el índice general de sustentabilidad, los mismos que se obtienen a través de encuestas. Para que el análisis de sostenibilidad sea operativo, es conveniente caracterizar el comportamiento de un número apropiado de indicadores relevantes. Éstos deben ser adecuados a los objetivos y escala de análisis, integrar variables, ser sensibles a un amplio rango de condiciones y a los cambios en el tiempo para que se puedan medir fácilmente y ser confiables así como sencillos de entender (Sarandón 2002).

Márquez et al. (2016), en la selva alta de Cusco-Perú, encontraron, utilizando el método adaptado para fincas cafetaleras, que los sistemas agroforestales de café con certificación orgánica tienen los índices más altos de sustentabilidad económica y ambiental que el sistema de producción convencional. Aplicando el mismo método de análisis, Merma y Julca (2012), en la misma zona de estudio encontraron como sustentables a las fincas con cultivos diversificados de mango (*Mangifera indica*), cacao (*Theobroma cacao*), plátano (*Musa paradisiaca*), naranja (*Citrus sinensis*) y papaya (*Carica papaya*) establecidos tanto en sistemas de monocultivo como en sistemas agroforestales; y como no sustentables a las fincas con té (*Camellia sinensis*) y coca (*Erythroxylum coca*). Por otro lado, a través del método agroecológico rápido, Tuesta et al. (2017) encontraron que las fincas cacaoteras en el distrito de Huicungo (San Martín, Perú) son sustentables.

En la zona de estudio donde los agricultores desarrollan la actividad agroforestal asociando cultivos de cacao, copoazu (*Theobroma grandiflorum*), piña (*Ananas comosus*), cítricos, plátano y otros con especies forestales nativas de la región, existe escasa o nula información del efecto de estas especies sobre la sustentabilidad de estos sistemas, por lo que en presente estudio nos planteamos las siguientes preguntas de investigación: ¿serán sustentables los sistemas agroforestales existentes en la amazonia sur del Perú? ¿Cuáles son los valores de los indicadores de sustentabilidad económica, ecológica y sociocultural de estos sistemas agroforestales? ¿Cuál es el efecto de la riqueza de las especies vegetales de los SAFs en la sustentabilidad? En función de estas preguntas, los objetivos del presente estudio son: a) Evaluar y cuantificar los niveles de sustentabilidad de los SAFs en la Provincia de Tambopata del Departamento de Madre de Dios y b) Determinar el efecto de la riqueza de las especies vegetales de los SAFs en la sustentabilidad de los mismos.

## Material y métodos

### Localización del área de estudio

La investigación se realizó en la Provincia de Tambopata del Departamento de Madre de Dios, ubicado en la Amazonia Sur del

Perú (Fig. 1), donde existen dos estaciones bien definidas: la húmeda (Noviembre – Abril), caracterizada por la presencia de fuertes precipitaciones y altas temperaturas, y la estación seca (Mayo – Octubre) que se caracteriza por la ausencia de lluvias y temperaturas más bajas. El rango de precipitación fluctúa entre 1500 y 2500mm/año. Los suelos son aluviales antiguos, generalmente arcillosos rojos con poca fertilidad y pH ácido. Geográficamente está localizada entre los paralelos 11°56'54"-11°57'48" Latitud Sur y meridianos 68°53'25"-69°19'41.5" Longitud Oeste, donde la altitud varía entre 214-305 msnm.

### Encuestas, variables y tipos de sistemas agroforestales

La población de estudio estuvo conformada por 150 agricultores que tienen sistemas agroforestales con más de cuatro años de instaladas en la provincia de Tambopata. La muestra estimada fue 50 agricultores, la misma que fue calculada de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q}$$

donde:

N = Total de la población

$Z_{\alpha}^2$  = Nivel de confianza al 90% (valor = 1.645)

p = proporción esperada (0.5)

q = 1 - p (en este caso 1-0.5 = 0.5)

d = precisión de 90% (valor = 0.1)

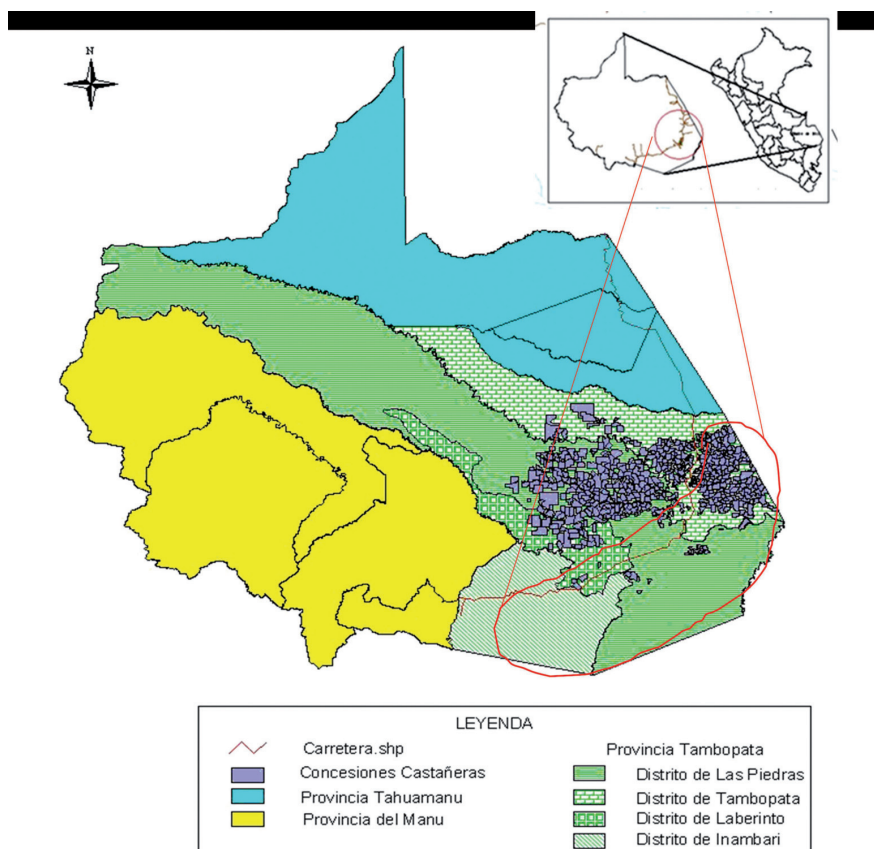
$$n = \frac{(150) (1.645^2) (0.5) (0.5)}{(0.1^2) (150 - 1) + (1.645^2) (0.5) (0.5)} = 46.8 \cong 50$$

En total se levantó información de 82 variables a través de encuestas con cuestionarios estructurados, observaciones de campo y toma de muestras de los agroecosistemas. En total se identificó 5 tipos de sistemas agroforestales, los mismos que tienen establecidos los siguientes cultivos: cacao (*Theobroma cacao*), copoazu (*Theobroma grandiflorum*), naranja (*Citrus sinensis*), plátano (*Musa paradisiaca*), piña (*Ananas comosus*) y araza (*Eugenia stipitata*); y las siguientes especies forestales: achihua (*Jacaranda copaia*), pashaco (*Schizolobium amazonicum*), lupuna (*Cavanillesia umbellata*), castaña (*Bertholletia excelsa*), guaba (*Inga sp*), sapote (*Matisia cordata*), tornillo (*Cedrelinga catenaeformis*), teca (*Tectona grandis*), caucho (*Hevea brasiliensis*), cetico (*Cecropia sp*), tahuari (*Tabebuia serratifolia*), pijuayo (*Bactris gasipaes*), aguaje (*Mauritia flexuosa*), capirona (*Calicophyllum megistocaulum*) y shimbillo (*Inga sp*) entre otras.

• **Sistema agroforestal tipo I.-** Comprende el 20% de la muestra de estudio. El área total de la finca tiene un promedio de 30.5 has, y el área destinada a sistemas agroforestales en promedio es de 5.0 has. El sistema agroforestal dominante está conformado por los cultivos de cacao, copoazu, naranja y plátano, y la combinación con las especies forestales de achihua, pashaco, lupuna, castaña, guaba y sapote, la edad promedio del SAF es 10 años, y la edad promedio del agricultor es 61 años, y tiene ingresos mensuales entre S/. 500-1700/mes.

• **Sistema agroforestal tipo II.-** Comprende el 32% de la muestra de estudio. El área total de la finca tiene un promedio de 33.3 has, y el área destinada a sistemas agroforestales en promedio es de 8.8 has. El sistema agroforestal dominante está conformado por los cultivos de copoazu, piña, naranja y plátano, y la combinación con las especies forestales de castaña, tornillo, pashaco, teca, caucho, cetico, achihua, tahuari y las palmeras de pijuayo y aguaje. La edad promedio del SAF es 11.3 años, y la edad promedio del agricultor es 48.8 años, y tiene ingresos mensuales entre S/. 1500-2500/mes.

• **Sistema agroforestal tipo III.-** Comprende el 6% de la muestra de estudio. El área total de la finca tiene un promedio de 116has, y el área destinada a sistemas agroforestales en promedio es de 13.6has. El sistema agroforestal dominante está conformado por



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio.

**Figure 1.** Location of the study site.

los cultivos de piña, copoazu, plátano y arazá, y la combinación con las especies forestales de castaña, achihua, tornillo y las palmeras de huasai y pijuayo. La edad promedio del SAF es 12.3 años, y la edad promedio del agricultor es 46.6 años, y tiene ingresos mensuales entre S/. 2000-3500/mes.

- **Sistema agroforestal tipo IV.-** Comprende el 18% de la muestra de estudio. El área total de la finca tiene un promedio de 69.4has, y el área destinada a sistemas agroforestales en promedio es de 7.6has. El sistema agroforestal dominante está conformado por los cultivos de cacao, copoazu y naranja, y la combinación con las especies forestales de guaba, pashaco, tornillo, castaña, capirona y la palmera de pijuayo. La edad promedio del SAF es 5.3 años, y la edad promedio del agricultor es 53 años, y tiene ingresos mensuales entre S/. 1000-2500/mes.
- **Sistema agroforestal tipo V.-** Comprende el 24% de la muestra de estudio. El área total de la finca tiene un promedio de 23.7has,

y el área destinada a sistemas agroforestales en promedio es de 5.7has. El sistema agroforestal dominante está conformado por los cultivos de cacao, naranja y plátano, y la combinación con las especies forestales de guaba, pashaco, achihua, tornillo, castaña, shimbillo, lupuna y la palmera de pijuayo. La edad promedio del SAF es 7.5 años, y la edad promedio del agricultor es 47.8 años, y tiene ingresos mensuales entre S/. 500-1500/mes.

#### Indicadores de sustentabilidad

Para evaluar la sustentabilidad se aplicó la metodología propuesta por Sarandón (2002) que propone el uso de indicadores económico, ecológico y sociocultural. Para lo cual se utilizaron los datos de las encuestas estructuradas, observaciones y evaluaciones de campo. En todos los casos se utilizó una escala de 0-4, donde 0 equivale a menos sustentable, y 4 más sustentable (Tabla 1, 2 y 3).

**Tabla 1.** Indicadores y escalas de valoración de la Dimensión Económica

**Table 1** Indicators and scales of assessment of the Economic Dimension.

Dimensión Económica	Escala de calificación				
	0	1	2	3	4
<b>A. Nivel de capitalización de la finca.</b>					
A1 Área de la finca	<8 ha	8-12 ha	12-20 ha	20-40 ha	>40 ha
A2 Cantidad de especies arbóreas	<2	2-5	5-6	6-7	>7
A3 Cantidad de especies cultivadas	<5	5-7	7-9	9-11	>11
A4 Tipo de vivienda	Choza con palos	Madera deteriorada	Madera sin piso	Madera con piso	Material noble
A5 Movilidad y transporte	no tiene	Motocicleta	Trimoto	Camioneta	Tractor agrícola
<b>B. Riesgo económico</b>					
B1 Diversificación para la venta	1 producto	2 productos	3 productos	4 productos	+4 productos
B2 Número de vías de comercialización	1 canal	2 canales	3 canales	4 canales	+4 canales
B3 Dependencia de insumos externos	80-100%	60-80%	40-60%	20-40%	0-20%
<b>C. Ingresos por actividad AF.</b>					
C1 Ingreso económico neto mensual	< S/. 600	S/. 600-800	S/. 800-1200	S/. 1200-1600	> S/. 1600

**Tabla 2.** Indicadores y escalas de valoración de la Dimensión Ecológica.**Table 2.** Indicators and evaluation scale of the Ecological Dimension.

Dimensión Ecológica	Escala de calificación				
	0	1	2	3	4
<b>A. Calidad del suelo</b>					
A1 Drenaje	Mal drenado	Débilmente drenado	Moderadam. drenado	Bien drenado	Fuertemente drenado
A2 Espesor del horizonte A	< 5cm	5-10cm	10-15cm	15-20cm	>20cm
A3 Erosión	Cárcava >10cm	Cárcava < 10cm	Poca	Superficial	No hay señal
A4 Cobertura del suelo	Sin cobertura	< 25%	25-50%	50-75%	> 75%
A5 pH	<3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	>5
A6 Materia orgánica	<0.5%	0.5-1%	1-1.5%	1.5-2%	>2%
A7 Acidez cambiante	>3	2.1-3	2.1-1	0.5-1	<0.5
<b>B. Capacidad de resiliencia</b>					
B1 Retención de humedad	Muy seco	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	muy húmedo
B2 Actividad biológica	No hay	Solo termitas	Termitas y lombrices	Lombrices y artrópodos	Diversidad de insectos
B3 Cobertura del suelo	Sin cobertura	< 25%	25-50%	50-75%	> 75%
B4 Nro. de macroinvertebrados del suelo	<50	50-100	100-150	150-200	>200
<b>C. Manejo de diversidad</b>					
C1 Cantidad de especies arbóreas	<2	2-5	5-6	6-7	>7
C2 Cantidad de especies cultivadas	<5	5-7	7-9	9-11	>11
C3 Índice de diversidad macroinvertebrados	< 0.7	0.7-1	1-1.3	1.3-1.7	>1.7
C4 Numero de ordenes macroinvertebrados	<5	5-6	6-7	7-8	>8
<b>D. Conservación de la vida del suelo</b>					
D1 Retención de humedad	Muy seco	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Muy húmedo
D2 Cobertura del suelo	sin cobertura	< 25%	25-50%	50-75%	> 75%
D3 Numero de macroinvertebrados	<50	50-100	100-150	150-200	>200
D4 Biomasa de macroinvertebrados	<5g	5-20g	20-40g	40-70g	>70g
D5 Carbono almacenado en el SAF	<50 T/ha	50-80 T/ha	80-110 T/ha	110-140 T/ha	<140 T/ha

**Tabla 3.** Indicadores y escalas de valoración de la Dimensión Socio cultural.**Table 3.** Indicators and evaluation scale of the Socio-cultural Dimension.

Dimensión Socio Cultural	Escala de calificación				
	0	1	2	3	4
<b>A. Satisfacción de necesidades básicas en la localidad</b>					
A1 Tipo de vivienda	Choza con palos	Madera deteriorada	Madera sin piso	Madera con piso	Material noble
A2 Acceso a la educación	Sin acceso	Inicial	Primaria	Secundaria	Superior
A3 Acceso a la salud	Sin acceso	Medico temporal	Sin centro de salud	Centro de salud con enfermero	Centro de salud con medico
A4 Acceso a servicios básicos (*)	Sin acceso	Solo teléfono	Teléfono y luz	Teléfono, luz y agua temporal	Teléfono, luz y agua todo el día
<b>B. Nivel de intensificación tecnológica.</b>					
B1 Nivel de formación en agroforestería	No tiene	1 curso	2 cursos	3 cursos	> 3 cursos
B2 Adaptación tecnológica	No genera	Copia del vecino	Recibe tecnología de una ONG	Recibe tecnología de Universidad o centro de investigación	Adopta tecnología
<b>C. Capacidad de gestión, metas y habilidades</b>					
C1 Pertenencia a una organización	independiente	1 organización	2 organizac.	3 organizac.	>3 organizac.
C2 Grado de dependencia de AF	no depende	<20%	20-40%	41-90%	91-100%

(\*) El acceso al agua se refiere al agua potable para consumo humano.

Para construir los indicadores de la calidad del suelo tales como pH, materia orgánica y acidez cambiante de la dimensión ecológica (Tabla 2), se tomaron muestras de suelo de todos los SAFs a 30cm de profundidad (con 10 submuestras en cada caso), y se enviaron para su análisis de caracterización al Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina-Perú. Así mismo se evaluó la macrofauna del suelo para construir algunos indicadores de la capacidad de resiliencia, manejo de la diversidad y conservación de la vida del suelo de la dimensión ecológica (ver Tabla 2), para lo cual se identificó, cuantificó y pesó a todos los individuos visibles

del suelo, de acuerdo a la metodología del Tropical Soil Biology and Fertility Programme (TSBF) (Anderson e Ingram 1993).

Para estimar la cantidad de carbono almacenado en el SAF se procedió de la siguiente manera: a) La biomasa de los árboles se estimó utilizando las ecuaciones alométricas generales para especies del Neotropico propuesta por Chave et al (2005), y para el cálculo de la biomasa del sistema radicular se utilizó la ecuación planteada por IPCC (2003), y b) el carbono almacenado en la vegetación se obtuvo multiplicando la biomasa estimada por un factor de 0,45 (Brown 1997).



### Cálculo del índice de sustentabilidad

Para el cálculo de los indicadores de sostenibilidad Económico, Ecológico y Sociocultural (IK, IE y ISC respectivamente), y para el cálculo del Índice de Sostenibilidad General (ISGen) se utilizaron las formulas de la **Tabla 4**, donde una finca es sustentable si ISGen  $> 2$ . Al mismo tiempo, ninguna de las tres dimensiones (IK, IE y ISC) debe tener un valor  $< 2$ .

### Relación entre la riqueza de especies vegetales y los indicadores de sustentabilidad

Se establecieron correlaciones entre los indicadores ecológico, económico y general de sustentabilidad con la cantidad de especies vegetales establecidas en los SAFs.

## Resultados

### Sustentabilidad económica

Se encontró que los tipos de sistemas agroforestales I, II, III y IV son sustentables económicamente, teniendo el índice de sustentabilidad más alto el tipo de SAF III (3.26), y los índices más bajos los SAFs I (2.25), II (2.67) y IV (2.66) (**Tabla 5**). El índice de sustentabilidad del SAF V es 1.99, valor inferior a 2 que lo hace no sustentable, debido principalmente a que el área destinada al SAF es pequeña (5.7has promedio) con respecto a los SAFs I, II, III y IV. Así mismo está dominado principalmente por el cultivo de cacao y naranja bajo sombra de guaba y otras pocas especies forestales, y sus ingresos mensuales fluctúan entre \$/. 500-1500.

El SAF V tiene el área de finca más pequeña, utiliza pocas especies arbóreas y cultivadas, los agricultores en general viven en viviendas precarias, tienen limitado acceso a la movilidad y el transporte, sus vías de comercialización son pocas, y por lo tanto sus ingresos económicos mensuales son los más bajos (**Fig. 2**). Por otro lado, el SAF III tiene el área de finca más grande, utiliza más cantidad de especies arbóreas y cultivadas, los agricultores en general tienen viviendas dignas y sus ingresos económicos mensuales son los más altos que los otros SAFs.

### Sustentabilidad ecológica

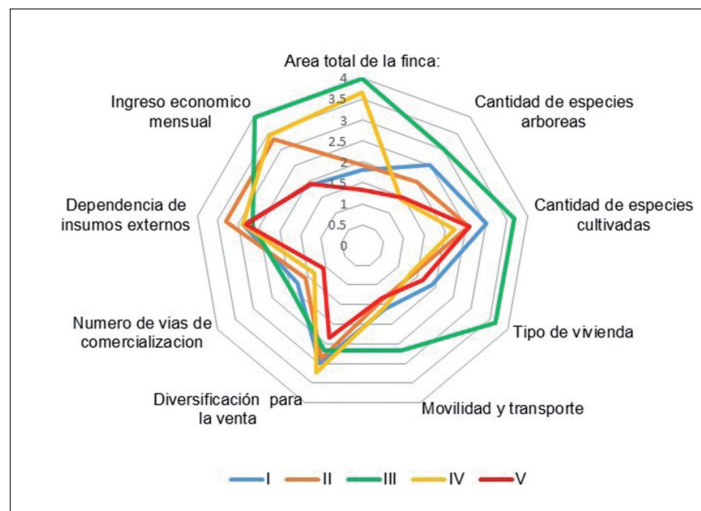
De acuerdo a la **Tabla 6**, los 5 tipos de sistemas agroforestales tienen índices superiores a 2, por lo tanto son sustentables ecológicamente, reportando los índices de sustentabilidad más altos los tipos de SAF III (3.19), I (2.97) y II (2.86), y el índice más bajo se observa en el SAF V (2.66).

Respecto a la calidad del suelo, los SAFs II y V tienen suelos con una delgada capa de materia orgánica (tierra negra) cerca de la superficie, hecho que explica su bajo nivel de materia orgánica. El pH de los suelos de los SAFs II, III y IV es extremadamente ácido, los mismos que contienen aluminio a niveles tóxicos, siendo mejores las condiciones de pH y de acidez cambiables para las plantas en los SAFs I y V (**Fig. 3**).

Todos los SAFs tienen una buena cobertura del suelo con abundante hojarasca que mejora las condiciones de humedad del suelo y las condiciones de vida en él. Así mismo cubre y protege el suelo de la erosión, tal como puede apreciarse en la **Figura 3**.

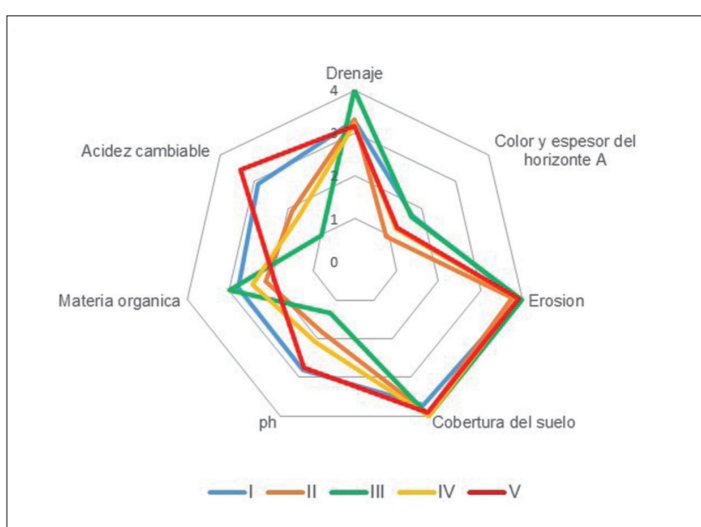
El SAF III tiene mejor capacidad de resiliencia que los otros SAFs, ya que según la **Figura 4** tiene mejor capacidad de retención de humedad por la presencia de abundante hojarasca en el suelo en forma de cobertura (que le hace soportar en mejores condiciones a la planta durante el periodo de sequía), así mismo se ha encontrado mayor actividad biológica en el suelo con la presencia de una gran cantidad de macroinvertebrados en el (**Fig. 5**).

En los SAFs I y III hay una mayor diversificación de cultivos, donde se tiene una mayor presencia de especies forestales y cultivadas. El SAF IV tiene mayor cantidad de macroinvertebrados en el suelo, pero sin embargo el índice de diversidad de macroinvertebrados es el más bajo de todos los SAFs, siendo este valor el más alto en el SAF III, donde también se encontró una mayor cantidad de órdenes de macroinvertebrados.



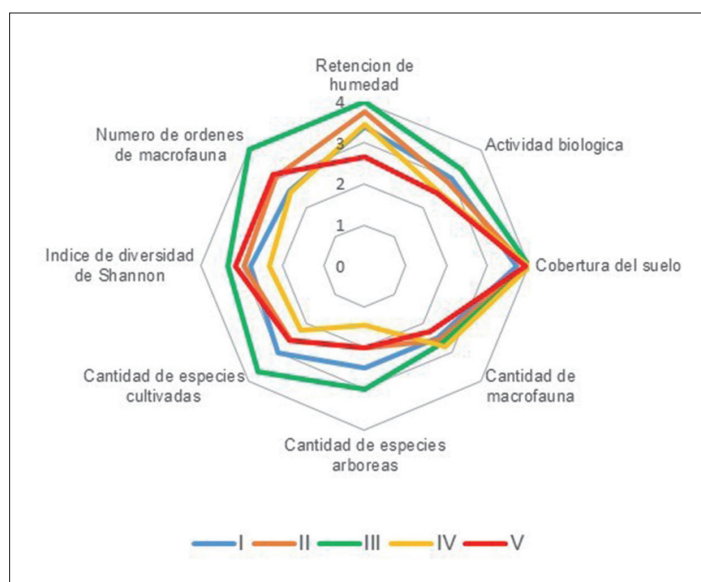
**Figura 2.** Indicadores de sustentabilidad económica.

**Figure 2.** Indicators of economic sustainability.



**Figura 3.** Indicadores de la calidad del suelo.

**Figure 3.** Indicators of soil quality.



**Figura 4.** Indicadores de la sustentabilidad ecológica: Capacidad de resiliencia y manejo de la diversidad.

**Figure 4.** Indicators of the ecological sustainability: Resilience capacity and diversity management.

### Sustentabilidad sociocultural

Los 5 tipos de sistemas agroforestales son sustentables socio-culturalmente, teniendo los índices de sustentabilidad más altos los SAFs I (2.75) y III (2.89), y el índice más bajo se observa en el SAF V (2.34) (**Tabla 7**).

En todos los SAFs no se han satisfecho las necesidades básicas tales como el acceso a servicios básicos de luz agua y teléfono, así como el acceso a servicios de salud y educación. El tipo de vivienda es otro problema, ya que en la mayoría de los casos se encuentran en precariedad (**Fig. 6**). Se observa también que a nivel organizacional están muy debilitados.

### Sustentabilidad general

De acuerdo a la **Tabla 8**, se observa que los índices de sustentabilidad para cada dimensión de los SAFs I, II, III y IV son superiores a 2, mientras que en el SAF V el indicador económico tiene un valor de 1.99 inferior a 2.

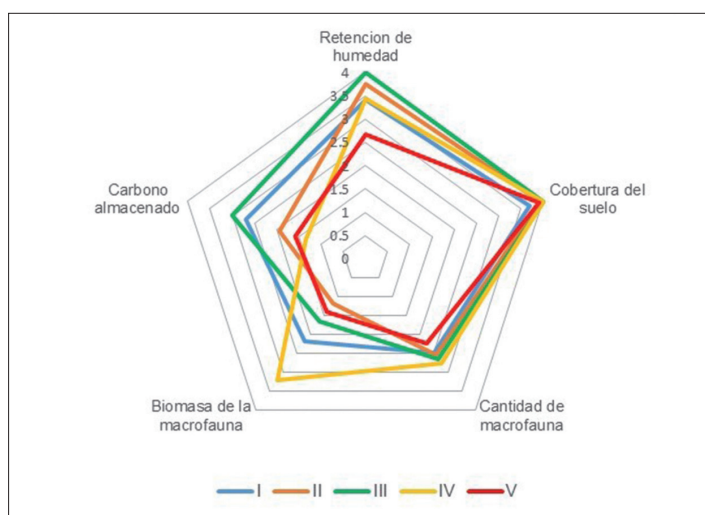
Aunque los Índices de Sustentabilidad General (IS Gen) de todos los SAFs son superiores a 2, no todos son sustentables, alcanzando este nivel los SAFs I, II, III y IV. El SAF V no es sustentable porque su indicador económico no alcanzó a 2.

### Efecto de la riqueza de las especies vegetales en la sustentabilidad

El SAF III presenta una mayor cantidad promedio de especies vegetales cultivadas (22 especies diferentes), es decir tiene una riqueza mayor con respecto a los SAFs I y II (que tienen en promedio 15.8 y 13.8 especies respectivamente). Los SAFs V y IV son los que tienen menos cantidad de especies en promedio (13.5 y 12.2 especies respectivamente), es decir su riqueza es la más baja (**Fig. 7**), y sus índices de sustentabilidad también.

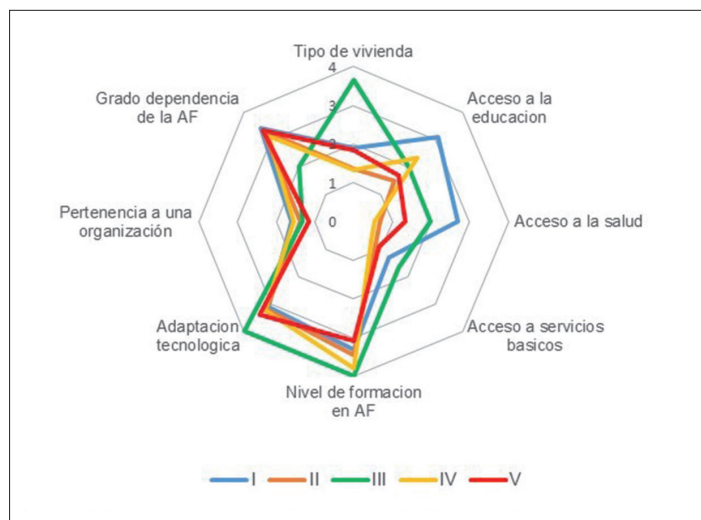
Efectuando un análisis de correlación entre los índices de sustentabilidad hallados anteriormente y la cantidad de especies vegetales de los SAFs, se pudo encontrar que existe una alta correlación con los indicadores ecológico ( $r = 0.95$ ), económico ( $r = 0.68$ ) y el índice de sustentabilidad general ( $r = 0.88$ ) (**Tabla 9**).

Los SAFs son más sostenibles mientras más diversidad de especies vegetales cultivadas haya en ellos (nótese en la **Figura 8** la existencia de una correlación alta,  $r^2 = 0.76$  y positiva, donde el índice de sustentabilidad general de los SAFs aumenta mientras aumenta las especies vegetales). Desde el punto de vista de la dimensión ecológica y económica se observa el mismo comportamiento.



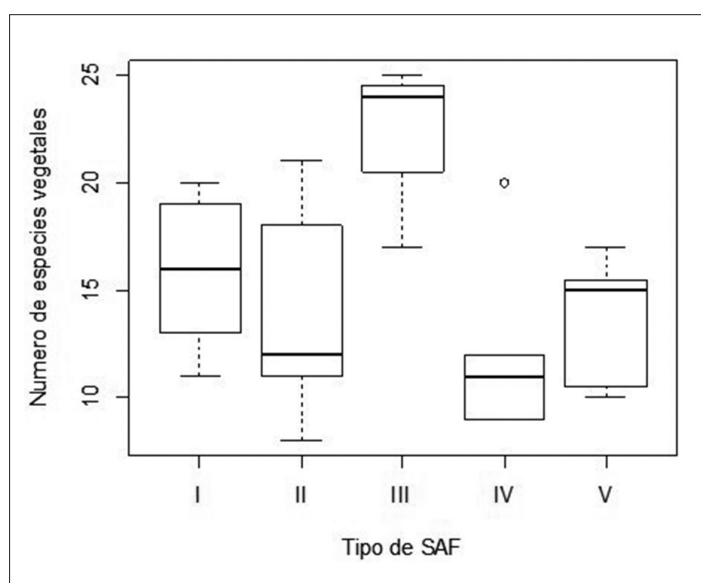
**Figura 5.** Indicadores de la sustentabilidad ecológica: Conservación de la vida en el suelo.

**Figure 5.** Indicators of the ecological sustainability: Conservation of life in the soil.



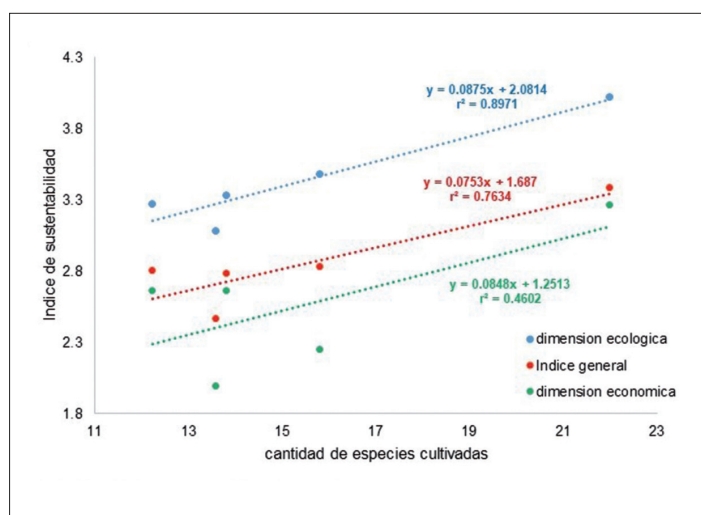
**Figura 6.** Indicadores socioculturales por cada tipo de SAF.

**Figure 6.** Sociocultural indicators of each SAF type.



**Figura 7.** Número de especies cultivadas por tipo de SAF.

**Figure 7.** Number of cultivated species by SAF type.



**Figura 8.** Correlación entre los índices de sustentabilidad y la cantidad de especies cultivadas.

**Figure 8.** Correlation between sustainability indexes and the quantity of cultivated species.

**Tabla 4.** Fórmulas para el Cálculo del Índice de Sostenibilidad.**Table 4.** Formulae for the calculus of the Sustainability Index.

Indicador	Formula
Económico (IK)	$\frac{\left[ \frac{A1 + 2A2 + 2A3 + A4 + A5}{7} \right] + \left[ \frac{B1 + B2 + 2B3}{4} \right] + C1}{3}$
Ecológico (IE)	$\frac{\left[ \frac{A1 + A2 + A3 + \dots + A7}{7} \right] + 2 \left[ \frac{B1 + B2 + B3 + B4}{4} \right] + 2 \left[ \frac{C1 + C2 + C3 + C4}{4} \right] + 2 \left[ \frac{D1 + D2 + D3 + D4 + D5}{5} \right]}{7}$
Socio-cultural (ISC)	$\frac{2 \left[ \frac{A1 + A2 + A3 + A4}{4} \right] + 2 \left[ \frac{B1 + B2}{2} \right] + \left[ \frac{C1 + 2C2}{3} \right]}{5}$
Índice General (ISGen)	$\frac{IK + IE + ISC}{3}$

**Tabla 5.** Índices de Sustentabilidad Económica por SAF.**Table 5.** Economic Sustainability Indexes by SAF.

Indicadores	Tipo de SAF				
	I	II	III	IV	V
<b>A. Nivel de capitalización de la finca</b>					
A1 Área de la finca	1.80	1.94	4.00	3.67	1.33
A2 Cantidad de especies arbóreas	2.50	2.00	3.00	1.44	1.50
A3 Cantidad de especies cultivadas	3.00	2.56	3.67	2.22	2.58
A4 Tipo de vivienda	1.90	1.38	3.67	1.33	1.67
A5 Movilidad y transporte	1.60	1.38	2.67	1.56	1.33
<b>B. Riesgo Económico</b>					
B1 Diversificación para la venta	3.00	2.88	2.67	3.22	2.33
B2 Número de vías de comercialización	1.80	1.56	2.00	1.33	1.08
B3 Dependencia de insumos externos	2.90	3.31	2.67	2.89	2.83
<b>C. Ingreso por actividad AF</b>					
C1 Ingreso económico mensual	1.90	3.31	4.00	3.44	1.92
<b>Índice de Sustentabilidad Económico (IK)</b>	<b>2.29</b>	<b>2.68</b>	<b>3.29</b>	<b>2.67</b>	<b>1.99</b>

**Tabla 6.** Índices de Sustentabilidad Ecológica por SAF.**Table 6.** Ecological Sustainability Indexes by SAF.

Indicadores	Tipo de SAF				
	I	II	III	IV	V
<b>A. Calidad del suelo</b>					
A1 Drenaje	3.30	3.31	4.00	3.22	3.17
A2 Color y espesor del horizonte A	1.70	0.94	1.67	1.22	1.25
A3 Erosión	3.90	3.75	4.00	3.89	3.92
A4 Cobertura del suelo	3.70	3.94	4.00	4.00	3.92
A5 ph	2.80	1.81	1.33	2.11	2.75
A6 Materia orgánica	2.80	2.13	3.00	2.44	1.92
A7 Acidez cambiante	2.90	1.88	1.00	1.67	3.42
<b>B. Capacidad de resiliencia</b>					
B1 Retención de humedad	3.40	3.75	4.00	3.44	2.67
B2 Actividad biológica	3.00	2.88	3.33	2.56	2.50
B3 Cobertura del suelo	3.70	3.94	4.00	4.00	3.92
B4 Cantidad de macroinvertebrados	2.50	2.56	2.67	2.78	2.25
<b>C. Manejo de la diversidad</b>					
C1 Cantidad de especies arbóreas	2.50	2.00	3.00	1.44	2.00
C2 Cantidad de especies cultivadas	3.00	2.56	3.67	2.22	2.58
C3 Índice de diversidad de Shannon	2.80	2.94	3.33	2.33	3.17
C4 Numero de ordenes	2.60	3.06	4.00	2.56	3.17
<b>D. Conservación de la vida del suelo</b>					
D1 Retención de humedad	3.40	3.75	4.00	3.44	2.67
D2 Cobertura del suelo	3.70	3.94	4.00	4.00	3.92
D3 Cantidad de macrofauna	2.50	2.56	2.67	2.78	2.25
D4 Biomasa de la macrofauna	2.20	1.19	1.67	3.22	1.42
D5 Carbono almacenado en el SAF	2.70	1.94	3.00	1.33	1.58
<b>Índice de Sustentabilidad Ecológico (IE)</b>	<b>2.94</b>	<b>2.82</b>	<b>3.26</b>	<b>2.75</b>	<b>2.68</b>

**Tabla 7.** Índices de Sustentabilidad Sociocultural por SAF.**Table 7.** Sociocultural Sustainability Indexes by SAF.

Indicadores	Tipo de SAF				
	I	II	III	IV	V
<b>A. Satisfacción de necesidades básicas</b>					
A1 Tipo de vivienda	1.90	1.38	3.67	1.33	1.83
A2 Acceso a la educación	3.10	1.50	2.00	2.33	1.67
A3 Acceso a servicios de salud	2.70	0.69	2.00	0.56	1.33
A4 Acceso a servicios básicos	1.30	0.81	1.67	0.67	0.92
<b>B. Nivel de intensificación tecnológica</b>					
B1 Nivel de formación en agroforestería	3.30	3.44	4.00	3.78	3.08
B2 Adaptación tecnológica	3.10	3.19	4.00	3.22	3.42
<b>C. Capacidad de gestión, metas y habilidades</b>					
C1 Pertenencia a una organización	1.60	1.38	1.33	1.56	1.17
C2 Grado de dependencia de AF	3.40	3.31	2.00	3.11	3.33
<b>Índice de Sust. Sociocultural (ISC)</b>	2.74	2.30	2.89	2.41	2.40

**Tabla 8.** Índices de Sustentabilidad General por SAF.**Table 8.** General Sustainability Indexes by SAF.

Indicadores	Tipo de SAF				
	I	II	III	IV	V
Económico (IK)	2.29	2.68	3.29	2.67	1.99
Ecológico (IE)	2.94	2.82	3.26	2.75	2.68
Sociocultural (ISC)	2.74	2.30	2.89	2.41	2.40
<b>Índice de Sustentabilidad General (IS Gen)</b>	2.66	2.60	3.15	2.61	2.36

**Tabla 9.** Correlación entre los indicadores de sustentabilidad y la cantidad de especies forestales de los SAFs.**Table 9.** Correlation between sustainability indicators and the quantity of SAF forestry species.

Índice de sustentabilidad	Coefficiente de correlación de Pearson (r)
Ecológico	0.95
Económico	0.68
General	0.88

## Discusión

Los índices de sustentabilidad económica hallados en el presente estudio son diferentes a los reportados por Márquez (2015), donde el sistema de producción orgánica de café alcanzó un valor de 2.06, y el sistema de producción convencional 1.61, explicado principalmente por el rendimiento de café. Por otro lado, Merma y Julca (2012) reportan índices entre 3.30 y 1.84, correspondiendo el índice más bajo al cultivo de té (*Camellia sinensis*).

Los indicadores ecológicos en todas las fincas estudiadas son superiores a 2 (umbral mínimo), mostrándonos su sustentabilidad ecológica, coincidiendo con los estudios de Márquez (2015) y Merma y Julca (2012), con excepción, en este último caso, del cultivo de coca (*Erythroxylum coca*) que tuvo un índice de 1.50. Estos indicadores superiores, podrían ser explicados por la diversificación de cultivos, biodiversidad espacial y cobertura vegetal que hay en los SAFs debido al mantenimiento de la diversidad biológica y protección de los suelos (Farfán 2007), optimizándose el ciclo de nutrientes con efectos positivos en las propiedades físicas y químicas del suelo (Pinho et al. 2012), lográndose disminuir la evapotranspiración y fijar nitrógeno en los suelos (Muschler 2001). Los SAFs ofrecen servicios ambientales, tales como secuestro de carbono, mantenimiento de la diversidad biológica y protección de suelos,

debido sobre todo a la cobertura del suelo con abundante hojarasca que mejora las condiciones de conservación del suelo y del agua, así como las condiciones de vida en él (Udawatta et al. 2017).

Los SAFs I, II, III y IV son sustentables (con índices de sustentabilidad general superiores a 2) y el SAF V no lo es debido a que en las fincas predomina el cultivo de cacao asociado con guaba con una edad promedio de 5.7 años establecidas en pequeñas áreas, mientras que Merma y Julca (2012) encontraron que las fincas con cultivos de café, cacao y frutales tienen mayores índices de sustentabilidad que las fincas con té y coca. Por otro lado, Tuesta et al. (2017) encontraron, por el "Método Agroecológico Rápido", que todas las fincas de cacao en SAFs evaluadas fueron sustentables.

El número de especies cultivadas en los SAFs es inferior a los reportados por Molla y Kewessa (2015) quienes encontraron de 28 a 33 especies, y por Kindt (2002) quien reportó 54 especies en promedio, variando de 28 a 97. El número total y promedio de especies es similar al reportado por Kindt et al. (2005), quienes encontraron 16.6 especies, las mismas que varían desde 15.7 hasta 17.5.

Una mayor diversidad de especies es más favorable en los SAFs (Pinho et al. 2012), ya que resulta en una ocupación más completa del espacio superior e inferior, y la variación en las carac-



terísticas de la hojarasca puede mantener un mayor nivel de biodiversidad del suelo, con efectos positivos en la fertilidad (Luizão y Luizão 1997; Vivan 1998). De acuerdo a la "hipótesis de aseguramiento" (Loreau et al. 2003) que indica que la diversidad estabiliza propiedades funcionales de las comunidades frente a perturbación ambiental, y que frente a los resultados obtenidos se podría afirmar que la diversidad de especies vegetales mejora la capacidad de resiliencia de los agroecosistemas, haciéndolos más sustentables.

## Conclusiones

Los índices de sustentabilidad económico, ecológico y socio cultural cuantificados para los sistemas agroforestales (SAFs) I, II, III y IV con diversidad de especies con cultivos, forestales y palmeras así como con mayor tiempo de producción fueron superiores a 2 demostrando individualmente su sustentabilidad. El SAF V no es sustentable porque su indicador económico fue inferior a 2 con menor diversidad de especies y tiempo de producción. Los índices de sustentabilidad de los SAFs mejoraron a medida que se encontraba más riqueza o diversidad de especies vegetales cultivadas en los agroecosistemas evaluados.

## Referencias

- Anderson, J.M., Ingram, J.S. 1993. Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. *Soil Science* 157(4): 265.
- Brown, S.A.J., Gillespie, J.R., Lugo, A.E. 1987. Biomass estimation methods for tropical forests with application to forest inventory data. *Forest Science* 35(4): 881-902.
- Brown, S. 1997. *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster H, et al. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145(1):87-99.
- Farfán F. 2007. Producción de café en Sistemas agroforestales. En Sistemas de producción de café en Colombia. Cap. VIII. Chinchiná, Cenicafé, Colombia.
- Farrell, J.; Altieri, M. 1999. Sistemas agroforestales. En: Altieri, M. (ed), *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*. Nordan-Comunidad, Montevideo, Uruguay.
- Ferraz, S.F.D., Vettorazzi, C.A., Theobald, D.M., Ballester, M.V.R. 2005. Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: assessment and future scenarios. *Forest Ecology and Management* 204: 67-83.
- Huerta, E. y Wal, V. 2012. Soil macroinvertebrates abundance and diversity in home gardens in Tabasco, Mexico, vary with soil texture, organic matter and vegetation cover. *Eur. J. Soil Biol.* 50:68 - 75.
- Inpe-Prodes (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales) 2010. Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite. [www.obt.inpe.br/prodes](http://www.obt.inpe.br/prodes).
- IPCC 2003. Climate change 2000: Synthesis Report. (Intergovernmental Panel on Climate Change); WMO (World Meteorological Organization); UNEP (United Nations Environmental Program). Geneva, Switzerland.
- Kindt, R. 2002. *Methodology for tree species diversification planning for African agroecosystems*. Tesis de doctorado, Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, Ghent, Belgium.
- Kindt, R., Simons, A., Damme, P. 2005. Do farm characteristics explain differences in tree species diversity among western Kenyan farms? *Agroforestry Systems* 63: 63-74.
- Laurance, W.F., Lovejoy, T.E., Vasconcelos, H.L., Bruna, E.M., Didham, R.K., Stouffer, P.C., Gascon, C., Bierregaard, R.O., Laurance, S.G., Sampaio, E., 2001. Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. *Conservation Biology* 16: 605-618.
- Lavelle, P., Senapati, B., Barros, E. 2003. Soil macrofauna. En: Schroth, G. y Sinclair. F. L. (eds.), *Trees, crops and soil fertility*. CABI Publishing, Wallingford, United Kingdom.
- Le Tourneau, J.F. 2004. Jusqu'au bout de la forêt? Causes et mécanismes de la déforestation en Amazonie brésilienne. *Mappe Monde* 75: 1-25.
- Loreau, M., Mouquet, N., Gonzales, A. 2003. Biodiversity as spatial insurance in heterogeneous landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100:12765-12770.
- Luizão, F., Luizão, R. 1997. Matéria orgânica do solo em Roraima. En: Barbosa, R.I., Ferreira, E.J.G., Castellón, E.G. (Eds), *Homem, Ambiente e Ecologia no Estado de Roraima*, pp. 363-376. INPA, Manaus, Brazil.
- Márquez, F., Julca, A., Canto, M., Soplin, H., Vargas, S., Huerta, P. 2016. Sustentabilidad ambiental en fincas cafetaleras después de un proceso de certificación orgánica en La Convención (Cusco, Perú). *Revista Ecología Aplicada* 15(2): 125-132.
- Márquez, R.F. 2015. *Sustentabilidad de la caficultura orgánica en La Convención-Cusco*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Masera, O., Astier, M., López-Ridaura, S. 1999. *Sustentabilidad y Manejo de Recursos Naturales. El Marco de Evaluación MESMIS*. Mundi-prensa, México.
- Merma, I., Julca, A. 2012. Caracterización y evaluación de la sustentabilidad de fincas en alto Urubamba, Cusco, Perú. *Revista Ecología Aplicada* 15(2): 1- 11.
- Molla, A., Kewessa, G. 2015. Woody Species Diversity in Traditional Agroforestry Practices of Dellomena District, Southeastern Ethiopia: Implication for Maintaining Native Woody Species. *International Journal of Biodiversity*.
- Muschler, R.G. 2001. Shade improves coffee quality in a suboptimal coffee zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems* (85): 131-139.
- Pinho, R., Miller, R., Alfaia, S. 2012. Agroforestry and the Improvement of Soil Fertility: A View from Amazonia. *Applied and Environmental Soil Science*.
- Rigby, D., Cáceres, D. 2001. Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural Systems* 68: 21-40.
- Sarandón, S., Flores, C. 2009. Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: una propuesta metodológica. *Agroecología* 4:19-28.
- Sarandón, S., Zuluaga, M., Cieza, R., Gómez, C., Janjetic, L., Negrete, E. 2006. Evaluación de la sustentabilidad de sistemas agrícolas en fincas de Misiones, Argentina, mediante el uso de indicadores. *Agroecología* 1:19-28.
- Sarandón, S. 2002. El desarrollo y uso de indicadores para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas. En: Sarandón, S. (Ed.), *Agroecología: El camino para una agricultura sustentable*, pp. 393-414. Ediciones Científicas Americanas, La Plata, Argentina.
- Tuesta, O., Santistevan, M., Borjas, R., Castro, V., Julca, A. 2017. Sustainability of cacao farms in the district of Huicungo (San Martín, Perú) with the "rapid agroecological method". *Peruvian Journal of Agronomy* 1(1): 8-13.
- Udawatta, R., Gantzer, C., Jose, S. 2017. Agroforestry Practices and Soil Ecosystem Services, En: Mahdi M., Al-Kaisi, Birl Lowery (eds), *Soil Health and Intensification of Agroecosystems*, pp. 305-333. Academic Press, EE.UU.
- Velásquez, E. 2004. Bioindicadores de calidad de suelo basado en las poblaciones de macrofauna y su relación con características funcionales del suelo. Tesis de Doctorado, Universidad nacional de Colombia, Colombia.
- Vivan, J. 1998. Agricultura e Florestas: Princípios de uma integração vital, Agropecuária, Guaíba, Brazil.