

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



**VALORACIÓN ECONÓMICA DE FIJACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN
DOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN LA LOCALIDAD DE RÍO
TIGRE**

Tesis

Para optar el grado de:

INGENIERO FORESTAL

KATHERINE LIZETH GUERRERO SHUPINGAHUA

Tingo María – Perú

2026



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°046-2026-FRNR-UNAS

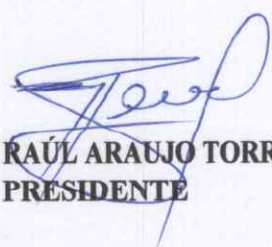
Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 20 de marzo de 2026, a horas 10:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Forestal de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

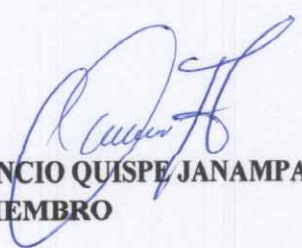
“VALORACIÓN ECONÓMICA DE FIJACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN LA LOCALIDAD DE RÍO TIGRE”

Presentado por la Bachiller: **GUERRERO SHUPINGAHUA, KATHERINE LIZETH** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“BUENA”**.

En consecuencia, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 09 de mayo de 2026


Ing. M. Sc. RAÚL ARAUJO TORRES
PRESIDENTE


Dr. DAVID PRUDENCIO QUISPE JANAMPA
MIEMBRO


Ing. M. Sc. MARIBEL FLORA ROCA CAPCHA
MIEMBRO


Ing. MSc. BRAYAN ANDRE CALDAS DE LA CRUZ
ASESOR





UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓNINSTITUTO DE
INVESTIGACIÓNUNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 204 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Forestal

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
VALORACIÓN ECONÓMICA DE FIJACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN LA LOCALIDAD DE RÍO TIGRE	KATHERINE LIZETH GUERRERO SHUPINGAHUA	17 % Diecisiete	Menor a 20 %

Tingo María, 13

de julio de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



VALORACIÓN ECONÓMICA DE FIJACIÓN DEL DIÓXIDO DE
CARBONO EN DOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN LA
LOCALIDAD DE RÍO TIGRE.

Autor : Katherine Lizeth Guerrero Shupingahua

Asesor : M Sc. Brayan André Caldas de la Cruz

Programa de investigación : Gestión de Bosques y Plantaciones forestales.

Línea de investigación : Biomasa y ecología forestal.

Eje temático : Biomasa aérea viva.

Lugar de ejecución : Localidad de Río Tigre.

Duración : 6 meses

Financiamiento : S/. 6 701,64

Tingo María – Perú, 2026



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

OFICINA DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DE TÍTULO

I. DATOS GENERALES DE PREGRADO

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad : Recursos Naturales Renovables
Título de Tesis : Valoración económica de fijación del dióxido de carbono en dos sistemas agroforestales de café en la localidad de Río Tigre.
Autor : Katherine Lizeth Guerrero Shupingahua
Asesor : M Sc. Brayan André Caldas de la Cruz
Escuela Profesional : Ingeniería Forestal
Programa de Investigación : Gestión de bosques y plantaciones forestales
Línea (s) de Investigación : Biomasa y Ecología Forestal
Eje temático de investigación : Biomasa aérea viva
Lugar de Ejecución : Localidad de Río Tigre
Duración del trabajo : 6 meses
Fecha de Inicio : setiembre del 2024
Término : febrero del 2025
Financiamiento : S/ 6 701,64

Katherine Lizeth Guerrero Shupingahua
Tesisista

M Sc. Brayan André Caldas de la Cruz
Asesor

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la salud y la constancia necesarias para culminar este proceso académico.

A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación permanente, que fueron fundamentales para continuar avanzando aun en los momentos de mayor exigencia personal y profesional.

A todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación académica y profesional, y que con su ejemplo y acompañamiento hicieron posible la culminación de esta etapa.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por la formación académica recibida y por brindarme los espacios y herramientas necesarias para el desarrollo de la presente investigación.

De manera especial, agradezco a mi asesor de tesis, por su orientación técnica, acompañamiento académico y valiosas recomendaciones, las cuales permitieron fortalecer la calidad científica del estudio.

Extiendo mi agradecimiento a los productores de café de la localidad de Río Tigre, quienes brindaron las facilidades necesarias para la ejecución del trabajo de campo y compartieron su experiencia y conocimientos, haciendo posible la obtención de la información requerida.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que, directa o indirectamente, contribuyeron al desarrollo y culminación de esta investigación

ÍNDICE

	Página.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo General	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. Sistemas agroforestales	3
2.1.1.1. Importancia de los sistemas agroforestales de café.....	4
2.1.1.2. Presencia de árboles en sistemas agroforestales y su capacidad para capturar y almacenar carbono.	4
2.1.2. Valoración económica	6
2.1.2.1. Valoración económica de servicios ecosistémicos	7
2.1.2.2. Métodos de valoración económica de dióxido de carbono	7
2.1.2.3. Bonos y mercado de carbono	9
2.1.3. Determinación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales	11
2.1.4. Marco normativo de los servicios ecosistémicos en el Perú	11
2.2. Conceptos básicos	11
2.2.1. Biomasa aérea	11
2.2.2. Stock de carbono	12
2.2.3. Fijación de dióxido de carbono (CO ₂).....	12
2.3. Estado de arte.....	12
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1. Lugar de ejecución	18
3.2. Descripción de los sistemas agroforestales de café.....	18
3.3. Materiales y métodos	20
3.3.1. Materiales y equipos.....	20
3.4. Metodología	20
3.4.1. Criterio de investigación	20
3.4.2. Técnicas de muestreo	21
3.4.3. Tipos de variables:	22
3.4.4. Desarrollo de la investigación	22

3.4.4.1. Cuantificación de la biomasa aérea existente en los sistemas agroforestales de café:.....	23
3.4.4.2. Valoración económica de la fijación del dióxido de carbono en los sistemas agroforestales de café:	27
4.1. Cuantificar la biomasa aérea existente en los sistemas agroforestales de café.	31
4.2. Valorar económicamente la fijación del dióxido de carbono en los sistemas agroforestales de café.....	35
V. CONCLUSIONES.....	41
VI. PROPUESTA A FUTURO.....	42
VII.REFERENCIAS	43
ANEXOS.....	49
Anexo 1. Registro fotográfico de campo	49
Anexo 2. Datos dasométricos y estimación de biomasa del componente arbóreo.	53
Anexo 3. Datos dasométricos y biomasa del cultivo de café.	55
Anexo 4, Datos primarios de submuestreo del componente arbustivo–herbáceo,	63
Anexo 5, Biomasa arbustiva–herbácea extrapolada por cuadrante,	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
1. Descripción de las dos parcelas con sistema agroforestal de café.	19
2. Escenarios de precio del carbono utilizados para la valoración económica del CO ₂ equivalente.	29
3. Biomasa aérea estimada por parcela y componente en sistemas agroforestales de café en la localidad de Río Tigre.	31
4. Biomasa aérea promedio por componente y sistema agroforestal de café (SAF 1 y SAF 2) en la localidad de Río Tigre.	33
5. Carbono almacenado por parcela y por componente en sistemas agroforestales de café.	35
6. Carbono almacenado promedio por componente en sistemas agroforestales de café (SAF 1 y SAF 2).	36
7. CO ₂ equivalente fijado por parcela y por componente en sistemas agroforestales de café.	37
8. Dióxido de carbono equivalente (CO ₂ e) promedio por componente en sistemas agroforestales de café (SAF 1 y SAF 2).	37
9. Valoración económica del dióxido de carbono equivalente (CO ₂ e), bajo tres escenarios de precio.	38
10. Valoración económica promedio del dióxido de carbono equivalente (CO ₂ e) almacenado en biomasa aérea por sistema agroforestal de café.	39
11. Datos dasométricos, biomasa aérea, carbono almacenado y CO ₂ equivalente del componente arbóreo en sistemas agroforestales de café (parcelas JAN-A1, JAN-A2, PGF-A1 y PGF-A2).	53
12. Datos dasométricos y estimación de biomasa aérea del cultivo de café en sistemas agroforestales evaluados.	55
13. Pesos fresco y seco de submuestras del componente arbustivo–herbáceo por cuadrante,	63
14. Estimación de biomasa arbustiva–herbácea por cuadrante y parcela (t/ha),	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1. Ubicación de la localidad de Río Tigre.	18
2. Ubicación de las parcelas evaluadas en localidad de Río Tigre.	19
3. Flujograma del procedimiento metodológico.	23
4. Dimensiones de las parcelas temporales de evaluadas.	25
5. Distribución de las parcelas temporales de evaluación dentro de los sistemas agroforestales de café.	25
6. Distribución de la biomasa aérea total en sistemas SAF 1 y SAF 2.	33
7. Biomasa aérea total promedio ($\pm$ desviación estándar) en sistemas agroforestales de café SAF 1 y SAF 2.	34
8. Comparación del valor económico estimado de la fijación de CO ₂ e entre sistemas agroforestales de café (SAF 1 y SAF 2) bajo distintos escenarios de precio del carbono.	39
9. Delimitación de la parcela de muestreo.	49
10. Señalización del área de estudio.	49
11. Medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) en especies arbóreas.	50
12. Marcación de individuos arbóreos evaluados.	50
13. Medición de tallos de café mediante vernier.	51
14. Muestreo del componente arbustivo–herbáceo.	51
15. Pesaje de muestras de biomasa en laboratorio.	52
16. Secado de muestras de biomasa en estufa.	52

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo cuantificar la biomasa aérea, el carbono almacenado y la valoración económica de la fijación de dióxido de carbono (CO_2) en sistemas agroforestales de café en la localidad de Río Tigre, distrito de Mariano Dámaso Beraún, departamento de Huánuco, Perú. El estudio se desarrolló en dos fincas con sistemas agroforestales de café, bajo un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo y diseño no experimental.

La metodología comprendió la medición de los componentes arbóreo, cafetal y arbustivo–herbáceo mediante variables dasométricas y muestreos directos en campo. La biomasa aérea fue estimada con ecuaciones alométricas, el carbono almacenado se calculó utilizando un factor de conversión estándar y el CO_2 equivalente fue valorizado económicamente considerando escenarios de precio bajo, medio y alto.

Los resultados muestran que la biomasa aérea total de los sistemas evaluados varió entre 266,80 y 337,37 t ha⁻¹, siendo el cultivo de café el principal contribuyente, con una participación superior al 70 % del total de biomasa aérea, seguido por el componente arbóreo de sombra. El carbono almacenado osciló entre 120,06 y 151,82 tC ha⁻¹, equivalente a 439,92–556,29 tCO₂ ha⁻¹. La valoración económica del CO_2 fijado osciló entre USD 10 998 y USD 41 722 por hectárea, en función del escenario de precios considerado, se observó un importante potencial económico del servicio ecosistémico de fijación de carbono.

Se concluye que los sistemas agroforestales de café evaluados muestran capacidad de almacenamiento de carbono y beneficios ambientales y económicos relevantes, consolidándose como una alternativa productiva sostenible frente al cambio climático a escala local.

Palabras clave: Sistemas agroforestales (SAF), café, biomasa aérea, carbono almacenado, valoración económica.

ABSTRACT

This study aimed to estimate aboveground biomass, stored carbon, and the economic valuation of carbon dioxide (CO₂) sequestration in coffee agroforestry systems located in Río Tigre, Mariano Dámaso Beraún district, Huánuco, Peru. The research was conducted in two coffee-based agroforestry farms using a quantitative, descriptive approach with a non-experimental design.

Field measurements were carried out on tree, coffee, and shrub–herbaceous components using dasometric variables and direct sampling techniques. Aboveground biomass was estimated through allometric equations, stored carbon was calculated using a standard conversion factor, and CO₂ equivalents were economically valued under low-, medium-, and high-price carbon scenarios based on market reference values.

Results indicate that total aboveground biomass ranged from 266.80 to 337.37 t ha⁻¹, with coffee plants contributing more than 70% of total biomass due to their higher density compared to shade trees. Stored carbon varied between 120.06 and 151.82 tC ha⁻¹, equivalent to 439.92–556.29 tCO₂ ha⁻¹. The economic valuation of sequestered CO₂ ranged from USD 10,998 to USD 41,722 per hectare depending on the price scenario considered, showing the potential economic relevance of carbon sequestration as an ecosystem service.

It is concluded that the evaluated coffee agroforestry systems show notable capacity for carbon storage and environmental benefits, representing a sustainable productive alternative for climate change mitigation at the local scale.

Keywords: Agroforestry systems, coffee, aboveground biomass, carbon stock, economic valuation.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es actualmente uno de los problemas ambientales más importantes a nivel mundial, debido principalmente al aumento progresivo de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2), en la atmósfera. Este fenómeno viene generando alteraciones en los ecosistemas, afectando tanto la estabilidad ambiental como las actividades productivas, especialmente en zonas rurales donde la agricultura depende directamente de las condiciones climáticas.

Frente a esta problemática, surge la necesidad de promover formas de producción más sostenibles que permitan no solo mantener la productividad, sino también contribuir a la mitigación del cambio climático. Los sistemas agroforestales se presentan como una alternativa, ya que integran árboles con cultivos agrícolas dentro de una misma superficie productiva, generando beneficios tanto ambientales como económicos.

Los sistemas agroforestales contribuyen a la captura y almacenamiento de carbono en su biomasa vegetal. Esta función beneficia a los cultivos como el café, donde la incorporación de árboles para sombra no solo mejora las condiciones del cultivo, sino que también incrementa la acumulación de carbono, disminuyendo así la reducción del CO_2 en la atmósfera.

A nivel del Perú, los sistemas agroforestales de café, si bien se practica su instalación, en muchos casos estos sistemas se manejan de manera empírica y no se cuenta con información técnica suficiente que permita cuantificar su aporte en términos de biomasa, carbono almacenado y, menos aún, su valor económico como servicio ecosistémico.

Esta situación también se presenta en la localidad de Río Tigre, ubicada en el distrito de Mariano Dámaso Beraún, donde el cultivo de café bajo sombra es una de las principales actividades productivas. A pesar de su importancia, no existen estudios específicos que permitan cuantificar cuánto carbono se está almacenando en estos sistemas ni cuál es el valor económico asociado a este servicio ambiental.

Ante esta limitación, surge la necesidad de generar información que permita comprender mejor el rol de los sistemas agroforestales en la mitigación del cambio climático y su potencial como fuente de beneficios económicos adicionales para los productores.

En ese sentido, la presente investigación se orienta a responder la siguiente pregunta: ¿Cuál es la valoración económica de la fijación del dióxido de carbono (CO_2) en los sistemas agroforestales de café en la localidad de Río Tigre?

A partir de esta interrogante, el estudio busca cuantificar la biomasa aérea, el carbono almacenado y su valoración económica, con el propósito de aportar información técnica que contribuya a una mejor gestión de los sistemas productivos y al aprovechamiento sostenible de los servicios ecosistémicos.

1.1. Objetivo General

- Estimar la valoración económica de fijación del dióxido de carbono (CO_2) en sistemas agroforestales de café en la localidad de Río Tigre.

1.2. Objetivos específicos

- Cuantificar la biomasa aérea existente en los sistemas agroforestales de café.
- Valorar económicamente la fijación del dióxido de carbono (CO_2) en los sistemas agroforestales de café.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Sistemas agroforestales

Ministerio de Agricultura y Riego. (2015), define los sistemas agroforestales una clase de sistemas de uso de la tierra que consisten en el manejo asociado de especies forestales y agropecuarias en una misma parcela en el espacio y en el tiempo. Incluyen prácticas de integración, preservación y manejo de especies leñosas perennes en sistemas productivos agrícolas anuales o perennes.

Los sistemas agroforestales (SAF), es el uso de la tierra basados en principios agroecológicos que asocian árboles perennes con cultivos agrícolas y, en algunos casos, componentes pecuarios, dentro de una misma unidad de manejo. Esta integración puede darse mediante sistemas productivos, generando interacciones ecológicas, y socioculturales que favorecen la sostenibilidad del mismo sistema. Desde un enfoque funcional, los SAF son sistemas dinámicos orientados al manejo eficiente de los recursos naturales, con el objetivo de diversificar la producción y maximizar beneficios ambientales, económicos y sociales de forma simultánea (Atangana et al., 2014).

Una de las principales fortalezas de los sistemas agroforestales radica en su capacidad para mejorar la funcionalidad ecológica de los agroecosistemas sin comprometer la productividad agrícola. La incorporación de especies leñosas aumenta la biomasa aérea y subterránea, fortalece la resiliencia frente a la degradación del suelo y reduce la vulnerabilidad ante la variabilidad climática. En este sentido, la agroforestería es una alternativa sostenible frente a los sistemas agrícolas convencionales, al permitir la producción de alimentos con la mitigación de gases de efecto invernadero mediante la acumulación de carbono en la biomasa vegetal y la reducción del CO₂ atmosférico (Sarkar y Das, 2020).

Los sistemas agroforestales ofrecen ventajas comparativas frente a sistemas de monocultivo al integrar sustentabilidad ambiental, económica y social. La diversidad estructural y funcional de estos sistemas agroforestales ayudan a la estabilidad productiva, la adaptación al cambio climático y la provisión de servicios ecosistémicos, alineándose con los enfoques y objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente aquellos referidos a la seguridad alimentaria, la acción climática y la gestión sostenible de los ecosistemas terrestres (Tovar y Rojas, 2023).

2.1.1.1. Importancia de los sistemas agroforestales de café

Los sistemas agroforestales de café se distinguen por su capacidad de contener altos niveles de biomasa aérea sin afectar de la productividad agrícola, convirtiéndose en una alternativa frente a los sistemas de monocultivo. La instalación de árboles como sombra, favorecen a la captura y almacenamiento de carbono, contribuyendo a la mitigación de emisiones de CO₂. El diseño de plantaciones agroforestales optimiza el espacio para mejorar las condiciones micro climáticas del cultivo, buscando la sostenibilidad productiva; en tal sentido, los sistemas agroforestales con café es una alternativa como una práctica para agricultura (Sarkar y Das, 2020).

Además, los sistemas agroforestales asocian el cultivo de café con especies arbóreas; esta asociación promueve la diversificación productiva, reduce la vulnerabilidad económica de las familias rurales y favorece la estabilidad de los ingresos. Históricamente, la producción de café bajo sombra ha sido una práctica usual en América Latina, asociada a enfoques agroecológicos que fortalecen la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a perturbaciones climáticas y económicas (Ponce et al., 2018).

Los sistemas agroforestales con café desempeñan un papel importante en la conservación del suelo y la biodiversidad. La hojarasca aportada por los árboles hace que se incremente la materia orgánica del suelo, mejorando la disponibilidad de nutrientes y reduce la erosión (Notaro et al., 2014). Estos sistemas agroforestales también proveen hábitats para una amplia diversidad de especies de flora y fauna, superando los niveles de biodiversidad en sistemas de café en monocultivo (Valencia et al., 2014). La regulación del microclima, caracterizada por temperaturas más moderadas y mayor humedad relativa, resulta especialmente relevante en escenarios de cambio climático, al mitigar los efectos del aumento térmico y la variabilidad en las precipitaciones (Valencia et al., 2015).

La integración de árboles de sombra y cultivos permite no solo la producción de café, sino también de madera, frutos y otros bienes, fortaleciendo la seguridad alimentaria y el bienestar económico de los agricultores, a la vez que incrementa el secuestro de carbono en la biomasa y el suelo en comparación con sistemas no agroforestales (Oijen et al., 2010; Soto et al., 2009).

2.1.1.2. Presencia de árboles en sistemas agroforestales y su capacidad para capturar y almacenar carbono.

La presencia de árboles en los sistemas agroforestales desempeña un rol determinante en la captura y almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, debido a que incrementa la complejidad estructural del sistema y la acumulación de materia orgánica

vegetal. En esa línea, evidencia reciente en sistemas agroforestales del norte del Perú muestra que los sistemas agroforestales con mayor densidad y diversidad arbórea tienden a registrar mayores niveles de biomasa aérea y, por tanto, mayores existencias de carbono almacenado. Sánchez et al. (2025) evaluaron sistemas agroforestales café con guaba y cacao con laurel, y encontraron que el sistema con mayor componente arbóreo y estratificación vertical (café y guaba) presentó valores de biomasa aérea ($18,93 \text{ t ha}^{-1}$) y carbono almacenado ($9,47 \text{ tC ha}^{-1}$), en comparación con sistemas de monocultivo. Estos hallazgos confirman que los árboles, aparte de cumplir funciones productivas y ecológicas, actúan como reservorios de carbono, fortaleciendo el papel de los sistemas agroforestales como estrategias de mitigación del cambio climático en paisajes agrícolas.

La incorporación de árboles en los sistemas agroforestales incrementa la captura y el almacenamiento de carbono, principalmente por su mayor aporte de biomasa leñosa y por la prolongada permanencia del carbono en sus tejidos. En este sentido, se evidencia que los sistemas agroforestales referido al componente arbóreo puede concentrar entre el 60 % y más del 80 % del carbono almacenado en la biomasa aérea, dependiendo de factores como la densidad, la especie y la edad. Se ha reportado que los sistemas agroforestales con mayor diversidad estructural presentan stocks de carbono superiores a los sistemas agrícolas menos diversos, llegando a aproximarse a valores observados en bosques secundarios. Estos resultados refuerzan que los árboles cumplen un rol en la función de los sistemas agroforestales como sumideros de carbono y como herramientas de mitigación del cambio climático (Clemente, 2022).

Asimismo, la incorporación de árboles en sistemas agroforestales favorece para incrementar el almacenamiento de carbono en paisajes agrícolas, al aumentar significativamente la biomasa aérea y la permanencia del carbono fijado en el tiempo. Dado que los árboles poseen estructuras leñosas de larga vida útil, funcionan como reservorios relativamente estables de carbono, superando ampliamente la capacidad de almacenamiento de cultivos anuales o sistemas en monocultivo. En esa misma línea, estudios recientes desarrollados en regiones del Perú reportan que la cobertura arbórea en sistemas agroforestales puede alcanzar valores de biomasa aérea, superiores a 250 t ha^{-1} , en función de la densidad arbórea, la diversidad de especies y el manejo del sistema. Preciso resaltar, que los sistemas agroforestales con café, la presencia de árboles como sombra no solo incrementa el stock de carbono, sino que también mejora la eficiencia del uso del suelo, reduce la presión sobre bosques naturales y fortalece la resiliencia frente al cambio climático (Clemente, 2021).

Con base en datos de teledetección, se estimó que en 2010 el 43 % de todas las tierras agrícolas del mundo mantenían al menos un 10 % de cubierta arbórea, y que dicha proporción se incrementó en 2 % respecto a la década pasada. Al combinar estimaciones predeterminadas de almacenamiento de carbono del Nivel 1 del IPCC, estratificadas geográfica y bioclimáticamente, se estimó un total de 45,3 PgC almacenados en tierras agrícolas a nivel mundial, donde los árboles contribuyen con más del 75 %. Entre 2000 y 2010, la cubierta arbórea aumentó 3,7 %, lo que implicó un incremento de más de 2 PgC (equivalente a 4,6 %) del carbono de la biomasa; en promedio global, el carbono de biomasa aumentó de 20,4 a 21,4 tC ha⁻¹. Finalmente, las variaciones regionales muestran que Brasil, Indonesia, China e India registraron los mayores aumentos en carbono de biomasa almacenado en tierras agrícolas, mientras que Argentina, Myanmar y Sierra Leona presentaron las mayores disminuciones (Zomer et al., 2016).

2.1.2. Valoración económica

La valoración económica considera un enfoque teórico y metodológico orientado a asignar valores monetarios a los beneficios ambientales generados por los ecosistemas, especialmente en aquellos contextos donde dichos beneficios no cuentan con precios de mercado explícitos. En sistemas productivos agrícolas y agroforestales, este enfoque permite que las externalidades positivas asociadas a servicios ecosistémicos como la regulación climática, la captura de carbono y la sostenibilidad productiva. Desde la economía ambiental, la valoración económica integra métodos de mercado y no mercado, considerando valores de uso directo, uso indirecto y valores de no uso, lo que posibilita analizar la eficiencia, la rentabilidad social y la viabilidad económica de las intervenciones ambientales (Quirós et al., 2024).

En el caso de los sistemas agroforestales, la cuantificación de la biomasa y del carbono almacenado suma la base biofísica para la valoración económica del servicio ecosistémico de mitigación del cambio climático. La capacidad de los árboles agroforestales para capturar dióxido de carbono atmosférico y almacenarlo como carbono en la biomasa vegetal permite transformar este beneficio ambiental en términos monetarios. Los sistemas agroforestales alcanzan relevancia económica al generar beneficios ambientales medibles y cuantificables, los cuales pueden ser incorporados en evaluaciones costo–beneficio, modelos de incentivos ambientales o potenciales mercados de carbono (Sarkar y Das, 2020).

La valoración económica del patrimonio natural es estimar en términos monetarios los beneficios que los ecosistemas proporcionan a la sociedad, con el fin de apoyar

la toma de decisiones en políticas y estrategias de conservación. Para los servicios ecosistémicos de regulación, como la fijación de dióxido de carbono, el Ministerio del Ambiente del Perú propone el uso de métodos indirectos de valoración, como es el método de precios de mercado cuando existen referencias nacionales o internacionales. Este enfoque se basa en el uso de precios de referencia del carbono para estimar el valor económico del servicio ambiental de almacenamiento y captura de CO₂ en los ecosistemas (Ministerio del Ambiente, 2016).

La valoración económica es una herramienta que analiza los servicios ecosistémicos, ya que asigna valores monetarios a los beneficios proporcionados por los recursos naturales. Entendiéndose que los ecosistemas y los servicios que generan poseen un valor económico referencial, el cual puede expresarse en términos monetarios. En este sentido, la valoración económica visibiliza la importancia de los servicios ecosistémicos dentro de los sistemas productivos, buscando la conservación en el tiempo (Freeman et al., 2003).

2.1.2.1. Valoración económica de servicios ecosistémicos

La valoración económica de los servicios ecosistémicos, se debe entender que se traduce los beneficios ambientales en unidades monetarias. La valoración económica no busca comercializar la naturaleza, sino visibilizar el valor económico implícito de los servicios ecosistémicos que no tienen precios de mercado, como es la regulación climática, la captura de carbono o la provisión de servicios de soporte. Este enfoque se sustenta en el concepto de valor económico total, el cual integra valores de uso directo, valores de uso indirecto y valores de no uso (Arango et al., 2023).

La valoración económica de los servicios ecosistémicos es la estimación monetaria de los beneficios que los ecosistemas proporcionan a la sociedad (Costanza et al., 1997). En este sentido, la valoración económica es una herramienta analítica que contribuye a respaldar decisiones ambientales informadas y a fortalecer la integración de criterios ecológicos en los procesos de desarrollo (Barbier, 2007).

2.1.2.2. Métodos de valoración económica de dióxido de carbono

De acuerdo con la Guía de valoración económica del patrimonio natural, el Ministerio del Ambiente (2016) clasifica la valoración económica en dos grandes categorías: valor de uso y valor de no uso. El valor de uso comprende, el uso directo, asociado a los beneficios tangibles e inmediatos que las personas obtienen de los recursos naturales, como alimentos y materias primas; y, por otro lado, el uso indirecto, vinculado a los

beneficios derivados de los servicios de soporte y regulación que brindan los ecosistemas, tales como la purificación del aire, la regulación hídrica y la mitigación del cambio climático. En cambio, el valor de no uso incorpora el valor de existencia, relacionado con la importancia que la sociedad asigna a la existencia de un recurso natural, y el valor de legado, expresa el interés por conservar los ecosistemas para las generaciones futuras. En este marco, la guía destaca el método de precios de mercado como una alternativa para la valoración económica de la fijación de dióxido de carbono, el cual se basa en la utilización de precios observados o de referencia del carbono en mercados nacionales o internacionales para estimar el valor económico del servicio de secuestro de CO₂. Se advierte que este método puede subestimar el valor real del servicio ecosistémico cuando los mercados son incipientes o no reflejan plenamente los costos sociales y ambientales asociados (Ministerio del Ambiente, 2016).

Preciso indicar que, la asignación de emisiones de dióxido de carbono es la determinación de responsabilidades de reducción a nivel macroeconómico y en la distribución de permisos de emisión a nivel empresarial. Se han avanzado diversos enfoques para la estimación de emisiones de CO₂, los cuales han evolucionado en función de distintos principios y criterios de eficiencia. Zhou y Wang (2016) revisan de manera sistemática estos enfoques, clasificándolos en cuatro grandes grupos: métodos basados en indicadores, métodos de optimización, enfoques de teoría de juegos y métodos híbridos. Si bien los estudios iniciales privilegiaron el principio de equidad, investigaciones recientes otorgan mayor énfasis al principio de eficiencia, evidenciando que la elección del método de asignación influye en los resultados y en su viabilidad económica y política. Por lo tanto, se plantea la necesidad de seguir investigando mecanismos que permitan equilibrar equidad y eficiencia en la asignación de emisiones de carbono.

En el contexto de la valoración económica del CO₂, los precios referenciales del carbono son un insumo para la estimación monetaria del servicio ecosistémico de mitigación del cambio climático. Análisis regionales desarrollados por Ferrer et al. (2025), en el marco de estudios liderados por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), consideran información de mercados de carbono regulados y voluntarios, así como estimaciones del costo social del carbono. Además, indican que, en economías emergentes como el Perú, los precios sitúan alrededor de 25 USD por tonelada de CO₂, reflejando mercados con limitaciones institucionales. Asimismo, proponen un escenario conservador con valores superiores (25,83 USD/tCO₂) y plantean escenarios altos, con rangos entre 50 y 75 USD por tonelada de CO₂, considerados necesarios para internalizar los costos ambientales reales.

El costo social del carbono (SCC), es una base teórica adicional para la valoración económica del CO₂, al estimar el daño económico asociado a la emisión de una tonelada adicional de dióxido de carbono. Nordhaus (2014), a través del modelo de evaluación integrada DICE-2013R, estima un SCC de 18,6 USD por tonelada de CO₂, expresado en dólares, y señala que este valor tiende a incrementarse a una tasa aproximada del 3 % anual hasta el año 2050. Asimismo, resalta que la estimación del SCC está sujeta a desafíos analíticos, entre ellos la selección de la tasa de descuento, la consideración de daños climáticos y los efectos de políticas de mitigación incompletas, lo que refuerza la necesidad de emplear rangos de precios y escenarios múltiples en los ejercicios de valoración económica del carbono.

2.1.2.3. Bonos y mercado de carbono

Los bonos de carbono funcionan como un instrumento financiero para los esfuerzos respecto a la mitigación del cambio climático. En el Protocolo de Kyoto de 1997, mediante el cual se estableció la posibilidad de negociar, la reducción o evitación de una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) o su equivalente en otros gases de efecto invernadero. Estos bonos se generan a partir de proyectos orientados tanto a la captura directa de CO₂ como a la prevención de emisiones, abarcando iniciativas de forestación y reforestación, energías renovables, tratamiento de residuos y reducción de emisiones de metano, así como proyectos emergentes como los bonos de carbono azul, enfocados en la conservación de ecosistemas marinos. La validez de los bonos de carbono es respaldada por sistemas de verificación internacional que garantizan la integridad ambiental. Los bonos de carbono no solo facilitan el financiamiento de acciones climáticas, sino que también contribuyen a la formación de un precio de mercado del carbono, incentivando la reducción de emisiones y permitiendo a empresas avanzar hacia la neutralidad de carbono mediante mecanismos de compensación (Carbon Neutral+, 2022).

Los mercados de carbono, abarcan esquemas regulados como los voluntarios y estos han adquirido relevancia como herramientas para alcanzar los compromisos climáticos establecidos en el Acuerdo de París. Los mercados voluntarios se han consolidado como una alternativa para pequeños productores agrícolas, al permitir la comercialización de reducciones de emisiones verificadas generadas por prácticas sostenibles. Solidaridad Network (2023) destaca que los bonos de carbono es una oportunidad estratégica para los pequeños agricultores. Estos mercados enfrentan desafíos regulatorios y de calidad, los cuales pueden abordarse mediante criterios como la adicionalidad, la permanencia y la

trazabilidad. La plataforma como ACORN facilitan el acceso de pequeños productores a los mercados de carbono, reduciendo costos de transacción y barreras técnicas.

El Sistema Europeo de Negocio de CO₂ (SENDECO2) se considera un referente en la compraventa de derechos de emisión y en el asesoramiento técnico y administrativo a industrias sujetas al Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (EU ETS). La entidad está activa desde el 2004 y ha colaborado con más de 700 empresas a nivel mundial, especialmente en el sur de Europa, ofreciendo soporte en normativa, autorizaciones y gestión de emisiones. Por su parte, el precio del CO₂ en el mercado europeo ha alcanzado valores cercanos a 57,04 € por tonelada (SENDECO2, 2024).

Los proyectos REDD+ se han consolidado como un mecanismo financiero orientado a reducir la deforestación y degradación de los bosques mediante la emisión de Unidades de Carbono Verificadas (VCUs). En Brasil, estos proyectos operan bajo esquemas voluntarios, donde los precios del carbono se determinan a través de negociaciones bilaterales y presentan una elevada volatilidad. Estudios recientes señalan que la viabilidad económica de los proyectos REDD+ depende de la existencia de un precio mínimo del carbono, estimado en aproximadamente 18,6 USD por tonelada de CO₂ equivalente, por debajo del cual los proyectos resultan financieramente inviables. Asimismo, estos mercados se caracterizan por altos costos iniciales, largos periodos de recuperación de la inversión y niveles significativos de riesgo. A pesar de estas limitaciones, los mercados REDD+ son una alternativa para canalizar financiamiento hacia la conservación forestal y la mitigación del cambio climático en regiones tropicales (Plata et al., 2020).

La iniciativa “Asómbrate”, desarrollada por Solidaridad en alianza con la plataforma ACORN de Rabobank, es un caso emblemático de integración de pequeños productores cafetaleros al mercado internacional de carbono en la región San Martín, Perú. Mediante la implementación de sistemas agroforestales, cerca de mil productores de café lograron incorporarse a la certificación de captura de carbono, alcanzando promedios de aproximadamente 5 toneladas de CO₂ capturadas por hectárea durante el año 2022. Esta iniciativa permitió que, en una primera etapa, 20 caficultores recibieran pagos por servicios de captura de carbono, con montos promedio de S/ 5 441,54 (aproximadamente USD 1 440) y pagos máximos de hasta S/ 9 243,96 (USD 2 444,59), beneficiando progresivamente a un total de 376 productores. “Asómbrate” asegura un precio mínimo de €20 (USD 23) por tonelada de CO₂ removida, destinando el 80% de los ingresos directamente a los agricultores y el 20 % restante al mantenimiento del sistema de certificación. Este

modelo no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también mejora las condiciones de vida de las comunidades rurales (Solidaridad Network, 2023).

2.1.3. Determinación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales

La determinación de la biomasa y del carbono almacenado en sistemas agroforestales es un proceso para evaluar su contribución a la mitigación del cambio climático. Dado que no es posible medir directamente toda la biomasa presente en un sistema productivo, se recurre a metodologías basadas en muestreo y estimaciones indirectas, las cuales obtienen valores representativos con un nivel aceptable de precisión.

Una de las metodologías más utilizadas es la propuesta por Rügnitz et al. (2009), desarrollada por el Centro Mundial Agroforestal (ICRAF), la cual establece procedimientos técnicos para la medición de biomasa aérea, biomasa subterránea y carbono orgánico en diferentes sistemas de uso de la tierra, incluyendo sistemas agroforestales. Esta guía está orientada a pequeñas propiedades rurales y facilita la cuantificación del carbono mediante técnicas accesibles y adaptadas a condiciones de campo.

La metodología se basa en el establecimiento de parcelas de muestreo, dentro de las cuales se realiza la medición del diámetro y la altura de los árboles, así como la evaluación de la vegetación no arbórea mediante muestreos. A partir de estos datos, se emplean ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea, la cual posteriormente es convertida en carbono almacenado y dióxido de carbono equivalente. En ese sentido, la aplicación de esta metodología proporciona una base técnica para la cuantificación de biomasa y carbono.

2.1.4. Marco normativo de los servicios ecosistémicos en el Perú

En el contexto peruano, la valoración de los servicios ecosistémicos se encuentra respaldada por la Ley N.º 30215, Ley de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (MERSE), la cual reconoce que los ecosistemas generan beneficios económicos, sociales y ambientales, incluyendo el secuestro de carbono como un servicio ecosistémico. Esta normativa establece que dichos servicios pueden ser valorizados económicamente y vinculados a mecanismos de retribución orientados a la conservación, recuperación y uso sostenible.

2.2. Conceptos básicos

2.2.1. Biomasa aérea

Refiere a toda la materia orgánica viva presente por encima del suelo, incluyendo árboles, cultivos y otros componentes vegetales. Estos sistemas combinan la

agricultura y la silvicultura para crear sistemas de producción más diversificados, resilientes y sostenibles. Un aspecto clave de los sistemas agroforestales es su capacidad para aumentar la biomasa aérea, lo cual tiene implicaciones directas en la captura y almacenamiento de carbono, diversidad biológica, y la producción sostenible de alimentos y recursos maderables y no maderables (Hernández et al., 2017).

2.2.2. Stock de carbono

El stock de carbono en sistemas agroforestales se refiere a la cantidad total de carbono almacenada tanto en la biomasa vegetal (árboles, arbustos, cultivos) como en el suelo. Estos sistemas, que combinan elementos de la agricultura y la silvicultura, son reconocidos por su capacidad de secuestrar carbono atmosférico, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. Los stocks de carbono en sistemas agroforestales varían según la composición de especies, el manejo del sistema, las prácticas agrícolas, y las condiciones edafoclimáticas. Por su contribución a la mitigación del cambio climático, los sistemas agroforestales promueven la biodiversidad, mejoran la fertilidad del suelo y aumentan la resiliencia de los sistemas de producción frente a eventos climáticos extremos (Fernandes et al., 2018).

2.2.3. Fijación de dióxido de carbono (CO₂)

La fijación de dióxido de carbono (CO₂) en sistemas agroforestales se refiere al proceso biológico mediante el cual los árboles y cultivos presentes en estos sistemas capturan CO₂ de la atmósfera durante la fotosíntesis y lo convierten en materia orgánica, almacenándolo tanto en la biomasa vegetal (troncos, ramas, hojas y raíces) como en el suelo. Este proceso es fundamental para la mitigación del cambio climático, ya que reduce la concentración de CO₂ en la atmósfera. Los sistemas agroforestales, al combinar elementos forestales y agrícolas en un mismo espacio, no solo incrementan la eficiencia de la fijación de carbono en comparación con sistemas de uso de suelo monocultivo, sino que también promueven la biodiversidad, mejoran la calidad del suelo y aumentan la resiliencia de los ecosistemas agrícolas frente a eventos climáticos adversos (Soto et al., 2009).

2.3. Estado de arte

En estudios recientes desarrollados en el norte del Perú, Sánchez et al. (2025), en su artículo titulado “Cuantificación de carbono en la biomasa aérea de dos sistemas agroforestales (SAFS) en las Provincias de San Ignacio y Jaén – Cajamarca”, planteó como objetivo evaluar la biomasa aérea y el carbono almacenado en dos sistemas agroforestales contrastantes: café–guaba (*Coffea arabica* – *Inga edulis*) y cacao–laurel (*Theobroma cacao* –

Cordia alliodora) en las provincias de San Ignacio y Jaén, Cajamarca para cuantificar y comparar la capacidad de ambos sistemas para capturar y almacenar carbono como estrategia de mitigación del cambio climático. Mediante parcelas de muestreo aleatorio simple de 1 500 m², mediciones dasométricas y el uso combinado de métodos destructivos, ecuaciones alométricas y factores de conversión de biomasa a carbono, los autores estimaron la biomasa aérea y el carbono almacenado. Los resultados demostraron que el sistema café–guaba presentó mayor biomasa aérea (18,93 t ha⁻¹) y mayor almacenamiento de carbono (9,47 tC ha⁻¹) en comparación con el sistema cacao–laurel (6,09 t ha⁻¹ y 3,05 tC ha⁻¹, respectivamente), atribuido a su estructura multiestratificada y mayor densidad vegetal. Concluyó que los sistemas agroforestales diversificados, especialmente aquellos con presencia significativa de árboles, incrementan sustancialmente la captura de carbono y ofrecen aporte para la mitigación climática regional, constituyéndose en una base empírica relevante para la valoración biofísica y económica del carbono en paisajes productivos (p 2248-2267).

Gómez (2022), en su investigación titulada “Estimación de carbono almacenado en sistemas agroforestales de café, Distrito de Anco-La Mar, Región Ayacucho, 2019”, destaca como principal problema la evaluación precisa de esta estimación. La investigación se centró en una parcela de una hectárea de *Coffea arabica* y *Pinus tecunumanii*, propiedad del señor Edwin Huamán Gamboa, utilizó una metodología descriptiva basada en la guía para determinar el carbono en propiedades rurales pequeñas del ICRAF. Los resultados demostraron que la captura total de carbono del sistema agroforestal fue de 609,12 tC ha⁻¹, el componente que presentó mayor captura de carbono fue en el componente suelo con 438,29 tC ha⁻¹, seguidamente la captura de carbono en la biomasa aérea fue de 168,59 tC ha⁻¹ y finalmente se encontró la captura de carbono en la necromasa fue de 0,76 tC ha⁻¹ que representa la menor cantidad de carbono almacenado con respecto al componente biomasa aérea y suelo (p. 1-95).

Clemente (2022), en su artículo científico titulado “Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios – Perú”. Confirma que los sistemas agroforestales (SAF) son sumideros relevantes de carbono, especialmente cuando integran especies forestales de rápido crecimiento y alto porte. En la Estación Experimental Agraria San Bernardo (Madre de Dios), Clemente-Arenas (2022) cuantificó el carbono almacenado en la biomasa aérea de siete sistemas agroforestales con edades entre 1 y 17 años, estimando un total de 483,81 tC, lo que evidencia la elevada capacidad de estos sistemas para capturar CO₂ atmosférico. Los resultados muestran que especies como *Bertholletia excelsa* (castaña) y *Schizolobium*

amazonicum (pashaco) concentran los mayores aportes de carbono, incluso en sistemas relativamente jóvenes, lo que resalta la importancia de la composición florística y la edad del sistema. El estudio reporta una valoración económica del carbono, estimando ingresos potenciales superiores a USD 13 000 bajo precios de mercado vigentes, lo que refuerza el rol de los SAF como estrategias integrales de mitigación del cambio climático con beneficios ambientales y económicos para los productores (p 54-68).

Por su parte, Clemente (2021), en su artículo científico titulado “Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú”, planteó como objetivo evaluar el potencial de almacenamiento de carbono en diferentes sistemas agroforestales dentro del territorio peruano. La investigación empleó una metodología de análisis comparativo basada en estimaciones de biomasa aérea y carbono, utilizando datos de campo y factores de conversión estandarizados. Los resultados evidenciaron que los sistemas agroforestales presentan altos stocks de biomasa aérea, con valores que superan los 280 t ha⁻¹, siendo el componente arbóreo el principal contribuyente al carbono almacenado. Concluyó que la agroforestería es una alternativa efectiva para la mitigación del cambio climático en el Perú, al combinar producción agrícola con captura de carbono. El principal aporte del trabajo radica en consolidar evidencia empírica reciente que respalda el rol de los sistemas agroforestales como sumideros de carbono y en destacar la necesidad de fortalecer su incorporación en políticas públicas y mecanismos de valoración económica ambiental (p 180-196).

Pusare (2021), en su investigación titulada “Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020”. Abordo una comparación de la capacidad de almacenamiento de carbono entre sistemas agroforestales de café y como referencia de un sistema no agroforestal se incluyó un bosque nativo: i) sistema agroforestal de café-pacay con el bosque nativo y ii) sistema agroforestal café-pino con bosque nativo. Ambos cubren un área de 4,5 hectáreas aproximadamente. Los resultados revelaron que la capacidad y valor económico de los servicios ambientales de almacenamiento de carbono orgánico del suelo es mayor en los bosques nativos (431 tCO₂e ha⁻¹, USD 11 766,57) en comparación con los sistemas agroforestales de cultivo de café (249,944 tCO₂e ha⁻¹, USD 6 810 997 en A; y 190,690 tCO₂e ha⁻¹, USD 5 196 308 en B). Concluyó que el sistema agroforestal que mejor se adapta a los impactos del cambio climático es el sistema agroforestal de café asociado con pacay porque tiene mayor capacidad de almacenamiento de carbono y mayor valor económico. (p. 1-127).

Asimismo, Hurtado (2020) investigó la “Reserva de Biomasa y Captura de Carbono de un Sistema Agroforestal de *Coffea arabica* L. y *Eucalyptus saligna*, Naranjillo, 2018”. La metodología de investigación fue descriptiva, en una (01) hectárea de sistema agroforestal de *Coffea arabica* L. Los resultados muestran que el componente que representó la mayor reserva de biomasa y carbono almacenado se estimó mediante modelos alométricos, la cual fue una fotografía aérea con 424,94 t ha⁻¹ o 191,22 t ha⁻¹. El componente arbustivo y herbáceo registró un valor de 2,36 t ha⁻¹ para reserva de biomasa y 1,06 t ha⁻¹ para almacenamiento de carbono. La hojarasca tuvo una biomasa de 1,24 t ha⁻¹ y el carbono almacenado fue de 0,56 t ha⁻¹. Concluyó que en promedio el sistema agroforestal almacena 428,55 t ha⁻¹ de biomasa y 279,83 tC ha⁻¹ de carbono (p. 1-74).

Nieto (2020) en su estudio titulado “Valoración económica de la reserva de carbono en biomasa aérea mediante la aplicación de fotogrametría y teledetección – San Martín, 2018”. La metodología utilizada fue descriptiva ya que se basó en la propuesta de estudiar la evaluación económica del servicio ecosistémico de secuestro y almacenamiento de carbono según el uso y cobertura del suelo en la finca Estancia, teniendo en cuenta la metodología basada en fotogrametría. Teledetección con drones y SIG, mediante el uso de dispositivos adecuados y programas de modelización correspondientes (QGIS, InVEST). Después de completar el proceso de modelado biofísico, se generaron resultados basados en las diferencias en la cantidad de carbono entre escenarios. Este valor da la idea de las posibles ganancias que podrían negociarse en los mercados de carbono. Asimismo, en ambos casos se utilizó el método del precio de mercado para determinar el valor económico del carbono almacenado. (p. 1-71).

Así mismo, Chappa (2019), en su estudio titulado “Valoración económica del servicio ambiental por secuestro de carbono en la biomasa aérea de diferentes sistemas agroforestales – en la Región San Martín - Perú”. La metodología utilizada fue de carácter descriptivo y no experimental y adaptó un diseño totalmente al azar con 5 tratamientos (parcelas de finca) y un bosque natural en la cuenca media y cuenca alta del río Cumbaza. El carbono promedio estimado en los sistemas agroforestales de cuenca media y cuenca alta del Río Cumbaza fue de 21,551 t ha⁻¹ y 15,395 t ha⁻¹ respectivamente. El valor económico total de los sistemas agroforestales en la cuenca del Río Cumbaza es de S/. 78 086 986,2745 (S\$ 23 662 723,113) y el VET promedio por hectárea es de S/. 220 995,0 (S\$ 66 968,18). El beneficio económico ambiental por secuestro de C en los sistemas agroforestales contribuye en S/.220 995,0 ha⁻¹ frente al beneficio económico de la conservación de S/.725,54 ha⁻¹ y es comparativamente superior a los sistemas no agroforestales y el impuesto ecológico sobre el

valor agregado (IVA), se estimó en S/.2 455 645,2 para 9 años (2008 a 2016) o S/.272 849,5 anuales, con este monto anual se propone el instrumento económico en la instalación de 69,32 ha año⁻¹ de sistemas agroforestales en la cuenca del Río Cumbaza (p. 1-146).

Díaz (2019), en su investigación sobre la “Estimación de la captura de carbono de dos sistemas agroforestales de café en la Provincia de Rioja, San Martín, Perú”, centradas en cultivos de café en combinación con pinochuncho y eucalipto torrellano, respectivamente. Considero la pregunta central ¿Existe variaciones significativas en la captura de carbono entre ambos sistemas? A través de un enfoque metodológico descriptivo, que incluyó recolección de datos de campo y análisis de suelo, la investigación siguió las directrices del Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF) para cuantificar el carbono en diferentes componentes de estos sistemas. Los hallazgos revelaron que el promedio de carbono por componente evaluado en el sistema agroforestal “eucalipto torrellano” + “café” fue de 61,642 tC ha⁻¹ para biomasa aérea, 0,473 tC ha⁻¹ para necromasa y 728,100 tC ha⁻¹ para suelo; en el sistema agroforestal “pino chuncho” + “café” el promedio por componente evaluado fue de 69,301 tC ha⁻¹ para biomasa aérea, 1,003 tC ha⁻¹ para necromasa y 1060,694 tC ha⁻¹ para suelo. Aunque las diferencias en la captura de carbono en la biomasa aérea entre los dos sistemas no fueron estadísticamente significativas, se observaron diferencias notables en la necromasa y el carbono del suelo. Este resultado subraya la superioridad del sistema agroforestal con pinochuncho y café en términos de capacidad de captura de carbono, atribuible a mayores dimensiones de los árboles medidos por el diámetro a la altura del pecho, un mayor peso de la necromasa y un contenido más alto de materia orgánica en el suelo (p. 1-94).

Gonzáles (2018) en su estudio titulado “Carbono almacenado en sistemas agroforestales de *coffea arabica* L. “café” de 4 y 7 años en relación con la gradiente altitudinal, Huánuco”. La metodología de la investigación corresponde al nivel explicativo con un diseño cuasi experimental, debido que los factores considerados en el estudio no se asignaron al azar a los predios ni se emparejaron, sino que dichos sistemas estaban conformados antes del experimento: son grupos intactos. Para la evaluación de biomasa vegetal en plantas de café y guaba se utilizó la metodología recomendada por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF) y para el carbono almacenado en el suelo se obtuvo mediante análisis de suelos por el método de Walkley Black. Los resultados obtenidos, de la biomasa vegetal en J. M. Ugarteche de 4 y 7 años son altos con 73,16 y 36,06 t ha⁻¹ y para carbono fue 73,07 y 98,08 tC ha⁻¹ respectivamente; mientras que para la zona Túpac Amaru alcanzaron valores medios con 45,70 y 46,26 t ha⁻¹ y 95,88 y 57,45 tC ha⁻¹ y en

la zona Chipaquillo fueron bajos con 26,17 y 27,98 t ha⁻¹ y 74,39 y 84,59 tC ha⁻¹, mostrando diferencias estadísticas significativas entre cada componente analizado; en cuanto a los indicadores económicos de Túpac Amaru, Ugarteche y Chipaquillo, el VAN fue 3 283,84, 2 783,30 y 2 031,45 soles; el TIR es 25,22, 23,86 y 21,41 % y el beneficio/costo es de 1,78, 1,66 y 1,48 soles. Por lo que concluyó que la mayor cantidad de carbono almacenado en la edad de 4 años fue mayor en la zona de Túpac Amaru con 98,88 tC ha⁻¹ y en la edad de 7 años fue mayor en J.M. Ugarteche con 84,59 tC ha⁻¹. (p. 1-126).

Finalmente, Cabrera (2016), estudió la “Estimación de biomasa aérea de *Inga edulis* mart. y *Coffea arabica* L. en el Alto Mayo, San Martín”, planteó como problema general ¿A cuánto asciende la biomasa aérea de *Inga edulis* mart y *Coffea arabica* L. en el Alto Mayo, San Martín? La metodología de la investigación fue descriptiva, Se estimó la biomasa aérea total de cada individuo de la muestra, evaluándose en total 15 árboles de *Inga edulis* y 65 arbustos de *Coffea arabica*. La etapa de campo implicó la realización de dos tipos de muestreos: uno no destructivo con los individuos de *Inga edulis* y otro destructivo con los individuos de *Coffea arabica*. Los árboles de *Inga edulis* fueron evaluados mediante la medición de sus diámetros a diferentes alturas, así como la medición de la longitud y el diámetro de las ramas principales por medio del uso del Realscopio de Biterlich, se calculó el volumen y se estimó la biomasa aérea total. El resultado demostró Los arbustos de *Coffea arabica* fueron medidos; sus hojas, ramas y tallos fueron cortados y pesados, y se tomaron submuestras de cada componente para medir el porcentaje de materia seca y a partir de esto estimar la biomasa aérea total. La cantidad de biomasa almacenada varió desde 16,15 kg a 586,05 kg por árbol de *Inga edulis* y desde 0,46 kg a 8,09 kg por arbusto de *Coffea arabica*. Se desarrollaron ecuaciones que estiman, con una alta precisión, la cantidad de biomasa almacenada utilizando las variables independientes diámetro (cm) y altura total (m) para cada ecuación. Las mejores ecuaciones de biomasa para cada especie se seleccionaron utilizando los valores del Cuadrado Medio del Error (CME) y los valores del Índice de Furnival (IF). Concluyó que las ecuaciones encontradas son exclusivas para individuos de *Inga edulis* y *Coffea arabica* que crecen en sistemas agroforestales en el Alto Mayo (p. 1-135).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El estudio se desarrolló en la localidad de Río Tigré, ubicada políticamente en el distrito de Mariano Dámaso Beraún, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco, Perú.

El área de estudio se localiza en la zona de ceja de selva, a una altitud aproximada de 882 m s. n. m., con coordenadas UTM Este: 383 663 y Norte: 8 965 108. Esta ubicación se caracteriza por presentar condiciones climáticas favorables para el desarrollo del cultivo de café bajo sistemas agroforestales, así como para la presencia de especies arbóreas de sombra.



Figura 1. Ubicación de la localidad de Río Tigré.

3.2. Descripción de los sistemas agroforestales de café

El estudio se ejecutó en 02 fincas con sistemas agroforestales de café ubicadas en la localidad de Río Tigré, distrito de Mariano Dámaso Beraún, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco. Cada finca presentó una superficie aproximada de una hectárea y correspondió a sistemas agroforestales establecidos, en fase productiva y bajo manejo convencional por parte de los productores.

Los sistemas agroforestales evaluados estuvieron conformados por el SAF 1 por el cultivo de café (*Coffea arabica* var. Castillo) Y SAF 2 (*Coffea arabica* var. Catimor), como componente principal, asociado con árboles de guaba (*Inga edulis*) utilizados como sombra permanente. La selección de las fincas se realizó mediante visitas de campo, durante las cuales se verificó la presencia del arreglo agroforestal, la accesibilidad a las parcelas y se coordinó con los propietarios la autorización para el desarrollo de las actividades de investigación.

Ambos sistemas presentaron una distribución uniforme del café, pero difirieron en distanciamiento, edad del cafetal y edad de la guaba (con espaciamiento similar), siendo estas características relevantes para el análisis comparativo de biomasa, carbono y fijación de CO₂ en cada sistema agroforestal.

La Tabla 1 resume las principales características de las parcelas evaluadas, incluyendo superficie, distanciamiento, variedades cultivadas y edad de los componentes vegetales.

Tabla 1. Descripción de las dos parcelas con sistema agroforestal de café.

Propietario	Parcela 1: Julia Ávila Nieves	Parcela 2: Pascual Gerónimo Figueroa
Coordenadas UTM	E: 383764, N: 8964365	E: 383731, N: 8965797
Superficie SAF (Ha)	1,00	1,00
Distanciamiento del café (m x m)	1,5 x 1,8	1,2 x 2,0
Variedad de café	Castillo	Catimor
Edad del café (años)	6	5
Especie asociada	Guaba (<i>Inga edulis</i>)	Guaba (<i>Inga edulis</i>)
Distanciamiento de guaba (m x m)	10 x 10	10 x 10
Edad de la guaba (años)	7	8

Las características descritas permitieron evaluar dos sistemas agroforestales de café bajo un mismo contexto territorial, pero con características estructurales distintas, lo cual facilitó la comparación de la biomasa aérea, el carbono almacenado y la fijación de dióxido de carbono, sin modificar el manejo cultural de los sistemas.

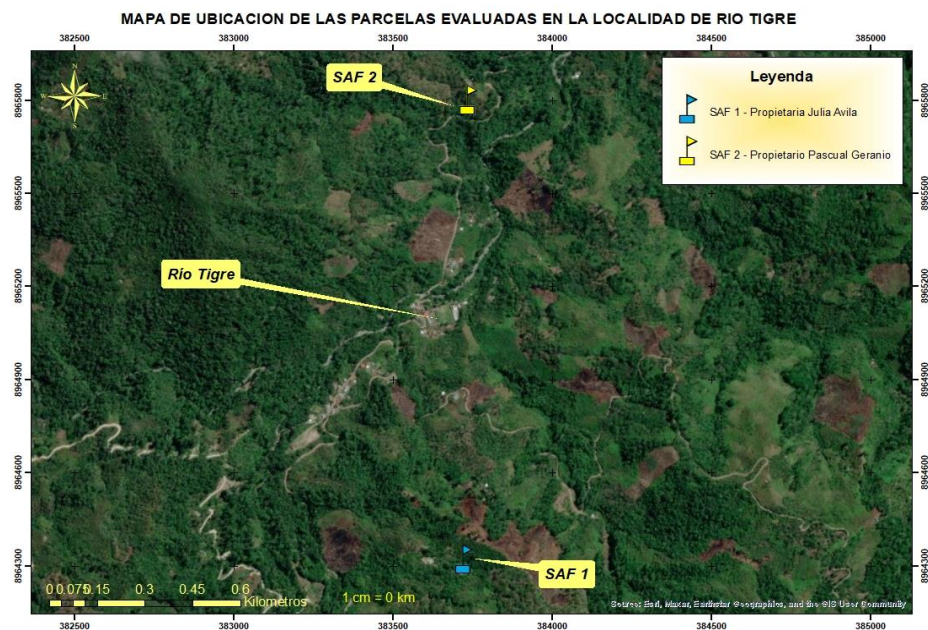


Figura 2. Ubicación de las parcelas evaluadas en localidad de Río Tigre.

3.3. Materiales y métodos

3.3.1. Materiales y equipos

Durante la ejecución de la investigación se realizaron actividades de delimitación de parcelas, medición dasométrica, recolección de muestras vegetales, codificación y registro de datos de campo, para lo cual se emplearon materiales y equipos adecuados a los objetivos del estudio.

Materiales: Se utilizaron wincha de 50 m, cinta diamétrica, vernier digital, bolsas de polietileno, papel periódico, rafia, cinta masking, lápices y formatos de registro de campo, los cuales permitieron la medición, rotulado, embalaje y transporte de las muestras vegetales recolectadas.

Equipos: Se emplearon una estufa de aire caliente para el secado de muestras vegetales, una balanza de precisión para la determinación de peso fresco y peso seco, un clinómetro para la medición de alturas, un GPS para el registro de coordenadas geográficas, una brújula para la orientación en campo y una cámara fotográfica para el registro visual de las parcelas y procedimientos realizados.

Estos materiales y equipos permitieron garantizar la adecuada medición de las variables dasométricas y la obtención de información confiable para la estimación de la biomasa aérea y el posterior cálculo del carbono almacenado y del dióxido de carbono equivalente en los sistemas agroforestales de café evaluados.

3.4. Metodología

3.4.1. Criterio de investigación

Clase de investigación: La investigación fue aplicada, porque se orientó a generar información útil para la valoración económica del servicio ecosistémico de fijación de CO₂ en sistemas agroforestales de café, a partir de mediciones directas de biomasa y estimaciones derivadas de carbono y CO₂ equivalente. El enfoque fue cuantitativo, dado que se emplearon mediciones de campo, ecuaciones alométricas y procedimientos de conversión y valoración económica.

Tipo de investigación: El estudio fue de tipo transversal, ya que la medición de variables se realizó en un único periodo de evaluación en las parcelas seleccionadas, representando la condición observada de los sistemas agroforestales durante el trabajo de campo.

Nivel de investigación: El nivel de investigación fue descriptivo, debido a que se cuantificó la biomasa aérea por componente (árboles, café y arbustivo–herbáceo), se estimó el carbono almacenado y el CO₂ equivalente, y posteriormente se calculó su valor económico bajo escenarios de precio del carbono establecidos en la metodología.

Diseño de la investigación: El estudio corresponde a un diseño comparativo–descriptivo no experimental, porque no se manipuló ninguna variable; únicamente se observaron y midieron las características biofísicas de los sistemas agroforestales y se estimó, mediante procedimientos estandarizados, el valor económico del CO₂e asociado a la biomasa aérea.

3.4.2. Técnicas de muestreo

Población: La población de estudio estuvo constituida por dos sistemas agroforestales de café ubicados en la localidad de Río Tigre, con una superficie aproximada de 1 ha por sistema, totalizando 2 hectáreas.

Muestra: La muestra correspondió al 15 % de la superficie total evaluada, equivalente a 0,3 ha, distribuida en cuatro parcelas temporales de evaluación, dos parcelas por cada sistema agroforestal. Este porcentaje fue considerado adecuado en función de la accesibilidad, los recursos disponibles y el carácter aplicado del estudio.

Muestreo: El tipo de muestreo fue no probabilístico, por conveniencia, debido a que los sistemas agroforestales fueron seleccionados considerando criterios de accesibilidad, disposición de los propietarios, uniformidad del cultivo de café y presencia de árboles de sombra, condiciones necesarias para cumplir los objetivos de la investigación. Este tipo de muestreo resultó pertinente, dado que el estudio no tuvo como finalidad realizar inferencias estadísticas poblacionales, sino describir y valorar biofísicamente los sistemas evaluados.

Unidad de análisis: La unidad de análisis estuvo constituida por las 4 parcelas temporales de evaluación, dentro de las cuales se realizaron las mediciones de biomasa aérea de los componentes arbóreo, café y arbustivo–herbáceo, así como las estimaciones de carbono almacenado, CO₂ equivalente y su valoración económica. Las parcelas temporales establecidas dentro de cada sistema agroforestal fueron consideradas unidades de observación independientes, lo que permitió capturar la variabilidad interna de cada sistema sin que ello implicara un diseño experimental con repeticiones controladas.

3.4.3. Tipos de variables:

Dado el carácter no experimental del estudio, no se definieron variables independientes manipuladas. En su lugar, se consideró como variable de clasificación el tipo de sistema agroforestal de café evaluado (SAF 1 y SAF 2), utilizado para comparar descriptivamente la biomasa aérea, el carbono almacenado y la valoración económica del CO₂e entre sistemas.

Variable 1

SAF = Tipos de sistemas agroforestales de café (X_1)

Indicadores

X_{11} = Superficie SAF

X_{12} = Numero de árboles de sombra plantados por hectárea

X_{13} = Practicas de gestión sostenible

Variable 2

VEFDC = Valor económico de la fijación del dióxido de carbono (Y_1)

Indicadores

Y_{11} = Biomasa aérea

Y_{12} = Stock de carbono

Y_{13} = Fijación del dióxido de carbono

Y_{14} = Valor económico potencial del CO₂e.

3.4.4. Desarrollo de la investigación

Para una mejor comprensión del proceso metodológico desarrollado en la presente investigación, se presenta el flujograma de las etapas del estudio, el cual resume secuencialmente las actividades realizadas desde la delimitación de las parcelas, la recolección de datos en campo, la estimación de biomasa, el cálculo del carbono y CO₂ equivalente, hasta la valoración económica del servicio ecosistémico.



Figura 3. Flujograma del procedimiento metodológico.

3.4.4.1. Cuantificación de la biomasa aérea existente en los sistemas agroforestales de café:

Para la estimación de la biomasa aérea existente en los sistemas agroforestales de café, se coordinó previamente con los propietarios de las fincas, quienes autorizaron el acceso a las parcelas y proporcionaron información general sobre el manejo de los sistemas evaluados. Esta etapa permitió identificar parcelas de una hectárea con una distribución relativamente uniforme del cultivo de café y la presencia de árboles de sombra, condiciones necesarias para el desarrollo del estudio.

Una vez identificadas las fincas, se realizó un recorrido preliminar del área de estudio con la finalidad de reconocer las características generales del sistema y definir los puntos de evaluación. Posteriormente, se delimitaron cuatro parcelas temporales de evaluación, dos parcelas por cada sistema agroforestal de café, las cuales forman parte de las unidades de estudio para la medición de la biomasa aérea.

La metodología empleada para la estimación de la biomasa aérea se basó en la Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales propuesta por Rüginitz et al. (2009), la cual es ampliamente utilizada en evaluaciones de biomasa y carbono en sistemas agroforestales. Se consideró que el manejo de los sistemas agroforestales variaba entre fincas, en función de las condiciones fisiográficas y las prácticas de los productores, por lo que la distribución espacial de los árboles de sombra no fue necesariamente uniforme.

En cada parcela temporal de evaluación se estableció un área de 20×50 m ($1\,000\text{ m}^2$) para la medición de los árboles con diámetros mayores a 20 cm. En esta área se registró el diámetro a la altura del pecho (DAP) a 1,30 m del suelo utilizando una cinta diamétrica, y la altura total se estimó mediante un clinómetro.

Dentro de esta parcela principal se estableció una subparcela de 10×50 m (500 m^2), en la cual se midieron los árboles con diámetros comprendidos entre 2,5 cm y 20 cm, siguiendo el mismo procedimiento de medición del DAP y la altura total.

Asimismo, se delimitó una subparcela de 10×25 m (250 m^2) para la evaluación del cultivo de café. En cada planta de café se midió el diámetro basal a 15 cm del suelo utilizando un vernier digital y se registró la altura total con una wincha métrica. La biomasa arbustiva y herbácea, correspondiente a individuos con diámetros menores a 2,5 cm, se evaluó mediante muestreo destructivo. Además, se establecieron cinco cuadrantes de 1×1 m, distribuidos aleatoriamente dentro de la parcela temporal de $1\,000\text{ m}^2$ (20×50). En cada cuadrante se extrajo toda la vegetación con tijera de podar y se registró el peso fresco total.

Posteriormente, las muestras fueron trasladadas al laboratorio, donde se secaron en una estufa de aire caliente a una temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un período de 72 horas, hasta alcanzar un peso seco constante. En los casos en que el volumen de material vegetal fue elevado, la muestra se subdividió en submuestras de aproximadamente 200 g, las cuales fueron secadas por separado. Los pesos secos obtenidos fueron integrados para estimar el contenido total de materia seca por cuadrante, manteniendo la proporcionalidad con el peso fresco recolectado. La biomasa aérea total por parcela se obtuvo a partir de la suma de la biomasa estimada para los componentes arbóreo, café y arbustivo–herbáceo, expresándose los resultados en toneladas por hectárea (t/ha), lo que permitió una comparación homogénea entre los sistemas agroforestales evaluados.

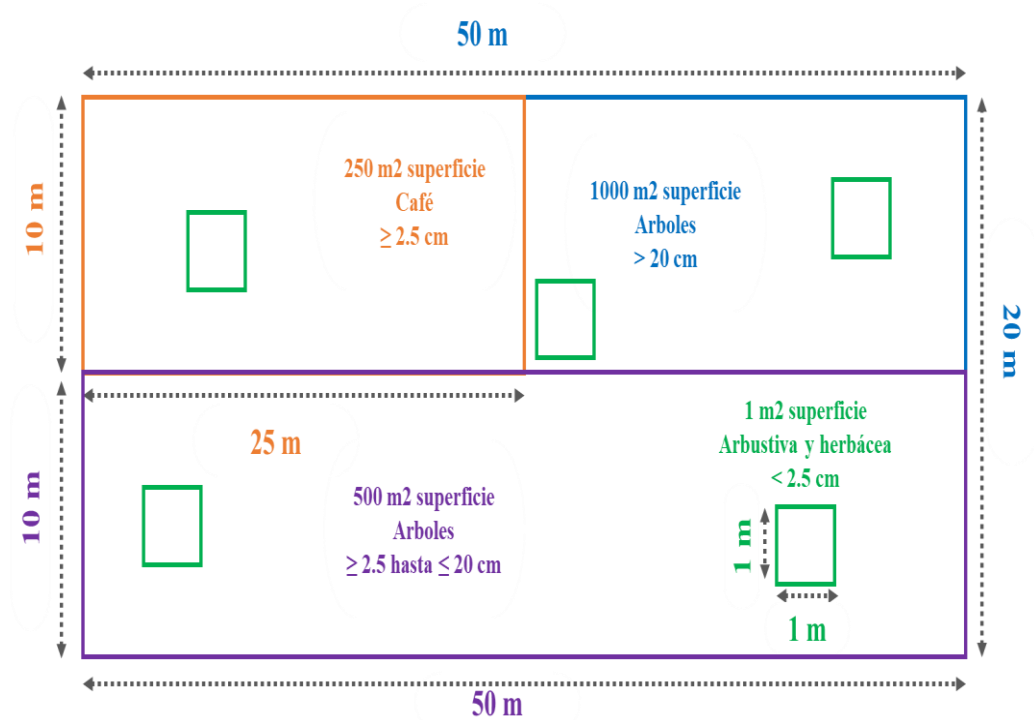


Figura 4. Dimensiones de las parcelas temporales de evaluadas.

A continuación, se muestra cómo fue la distribución de las 2 parcelas temporales de evaluación en cada sistema agroforestal de café:

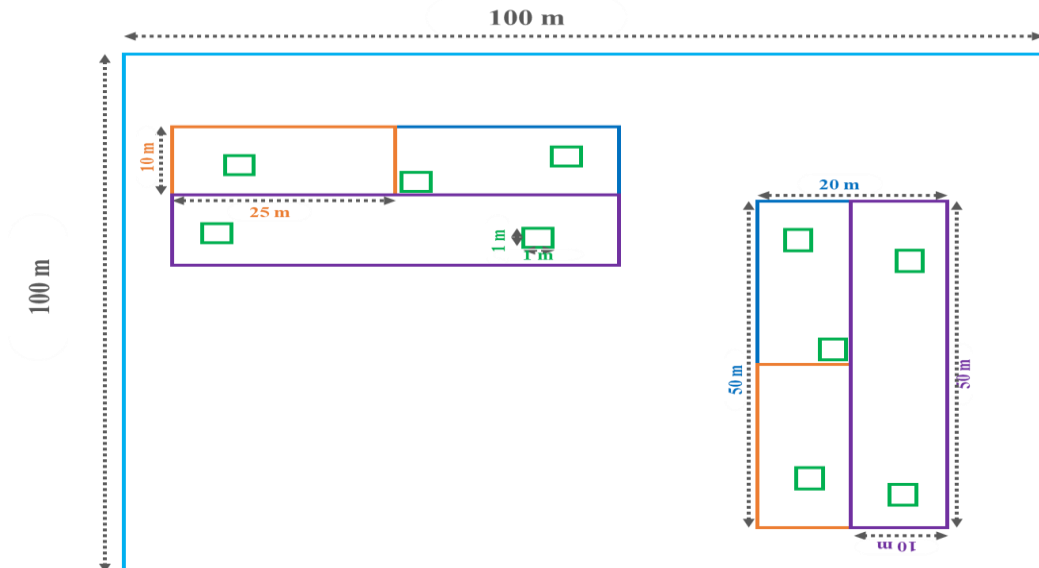


Figura 5. Distribución de las parcelas temporales de evaluación dentro de los sistemas agroforestales de café.

En cuanto a la estimación de biomasa, se consideró diferentes fórmulas propuestas, como sigue:

- **Para los árboles** se utilizó las fórmulas empleadas para la determinación del carbono aéreo y suelo establecidas por el ICRAF (Arévalo et al., 2003).

$$\text{Log}_{10}(\text{BA}) = -0,889 + 2,317(\text{Log}_{10}\text{DAP})$$

Donde:

BA: Biomasa de árboles de guaba (kg).

DAP: Diámetro a la altura del pecho (1,30 cm).

Constantes: -0,889 y 2,317

Se calculó la biomasa por parcela, sumando las biomásas de todos los árboles medidos y registrados (BTAV) en las parcelas de 20 m x 50 m (según el DAP).

$$BAVT \text{ (kg.)} = BA1 + BA2 + \dots + BAN$$

Donde:

BAVT: Biomasa de árboles en kg.

BAT: Biomasa de árboles

Para los transectos de 20 m x 50 m

$$BAVT \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = ((BAVT \text{ (kg)} / 1\,000 \text{ kg}) * 10\,000 \text{ m}^2) / 1\,000 \text{ m}^2$$

Donde:

BAVT : Biomasa de árboles vivos en t ha⁻¹

BTVA: Biomasa total de la parcela.

- **Para** la estimación de la biomasa **de la planta de café**, fue estimada a nivel individual por planta mediante el modelo alométrico propuesto por Suárez (2004). Posteriormente, las biomásas individuales fueron sumadas por parcela de muestreo (250 m²) para obtener la biomasa total por parcela, la cual fue extrapolada a toneladas por hectárea. A partir de este valor se estimó el carbono almacenado y el dióxido de carbono equivalente.

$$\ln B = -2,39 + 0,95 \ln (D) + 1,27 \ln (H)$$

Donde:

B: Biomasa del café (kg) por planta.

Ln: Logaritmo natural.

D15cm: Diámetro a 15 cm de la base de la planta.

H: Altura (m).

Constantes: -2,39; 0,95 y 1,27.

Se calculó la biomasa por parcela, sumando las biomásas de todos los cafés medidas y registradas (BTAV) en las parcelas de 10 m x 25 m (según el DAP).

$$BAVT \text{ (kg.)} = B1 + B2 + \dots + Bn$$

Donde:

BAVT: Biomasa de plantas de café en kg.

B: Biomasa de plantas de café.

Para los transectos de 10 m x 25 m

$$\text{BAVT (t ha}^{-1}\text{)} = ((\text{BAVT (kg)} / 1\,000 \text{ kg}) * 10\,000 \text{ m}^2) / 250 \text{ m}^2$$

Donde:

BAVT: Biomasa de plantas de café en t ha⁻¹

BTVA: Biomasa total de la parcela.

- Finalmente, para **arbustiva y herbácea**, en algunos cuadrantes, debido al volumen de material vegetal colectado, la muestra total fue subdividida en dos o más submuestras de aproximadamente 200 g de peso fresco, las cuales fueron secadas por separado. Posteriormente, los pesos secos obtenidos fueron integrados para estimar el contenido de materia seca total del cuadrante, manteniendo la proporcionalidad con el peso fresco total recolectado (Fracción de materia seca (MS): relación entre el peso seco y el peso fresco de la submuestra vegetal), fórmula utilizada:

$$\text{BAH (t ha}^{-1}\text{)} = [(\text{PSM} / \text{PFM}) * \text{PFT}] * 0,01$$

Donde:

BAH: Biomasa arbustiva / herbácea, materia seca (t ha⁻¹).

PSM: Peso seco de la muestra colectada (g).

PFM: Peso fresco de la muestra colectada (g).

PFT: Peso total por metro cuadrado (g).

0.01 : Factor de conversión cuando es de 1 m x 1m.

- Finalmente, se calculó de la biomasa sobre el suelo:

$$\text{BVT (t ha}^{-1}\text{)} = (\text{B} + \text{BA} + \text{BAH})$$

Donde:

BVT : Biomasa vegetal total.

B: Biomasa total de los arbustos de café.

BA : Biomasa total de árboles de guaba.

BAH: Biomasa arbustiva y herbácea.

3.4.4.2. Valoración económica de la fijación del dióxido de carbono en los sistemas agroforestales de café:

Una vez estimada la biomasa aérea total de los sistemas agroforestales de café, se procedió a calcular el carbono almacenado en la biomasa vegetal. Para ello, se asumió que el 45% de la biomasa seca corresponde a carbono, de acuerdo con el factor de conversión ampliamente utilizado en estudios de biomasa y carbono (Brown & Lugo, 1992). El carbono almacenado se estimó a partir de la biomasa aérea total expresada en toneladas por hectárea, aplicando la siguiente expresión:

$$CBV \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = BVT \times 0,45$$

Donde:

CBV : Carbono en la biomasa vegetal.

BVT: Biomasa vegetal total.

0,45: Constante (proporción de carbono, asumido por convención).

Posteriormente, el carbono almacenado fue convertido a dióxido de carbono equivalente (CO₂e), con el fin de expresar los resultados en una unidad comparable con los procesos de mitigación del cambio climático. Para ello, se utilizó el factor de conversión 3.6642, que corresponde a la relación estequiométrica entre el peso molecular del dióxido de carbono y el peso atómico del carbono:

$$CO_2 = C * 3,6642$$

Dónde:

CO₂ = Dióxido de carbono secuestrado en toneladas de CO₂ (tCO₂).

C = Stock de carbono en toneladas de carbono (tC).

3,6642 = Factor de conversión de carbono a CO₂, resultante del cociente de los pesos moleculares del dióxido de carbono y del carbono.
 Así: (Peso molecular del CO₂) / (Peso atómico del carbono).
 Peso del CO₂ = C + 2*O = 12,0107 + (2*15,9994) = 44,0095
 Peso del carbono = 12,0107.

La valoración económica de la fijación del CO₂ equivalente almacenado en la biomasa aérea se realizó con el objetivo de traducir los resultados biofísicos obtenidos en términos monetarios comparables, útiles para el análisis económico–ambiental y la toma de decisiones. Para este fin, se aplicó el método de valoración basado en precios de mercado, conforme a lo establecido en la guía nacional de valoración económica del patrimonio natural (Ministerio del Ambiente, 2016).

El valor económico del servicio ecosistémico de fijación de carbono se estimó multiplicando la cantidad total de CO₂ equivalente almacenado por un precio de referencia del carbono, según la siguiente expresión:

$$VE = CO_2 * \text{Precio en el mercado}$$

Dónde:

VE = Valor económico de la fijación de CO₂ (USD ha⁻¹)

CO₂e = Dióxido de carbono equivalente almacenado (tCO₂ ha⁻¹)

Con fines académicos y comparativos, se consideraron tres escenarios de precio del carbono, previamente definidos en la metodología, representativos de economías emergentes y del contexto de América Latina y el Caribe (Ferrer et al., 2025): (i) un escenario base asociado a economías emergentes, (ii) un escenario conservador y (iii) un escenario alto o ambicioso (Tabla 2). Estos escenarios permitieron evaluar la sensibilidad del valor económico estimado frente a variaciones en el precio del carbono.

Tabla 2. Escenarios de precio del carbono utilizados para la valoración económica del CO₂ equivalente.

Escenario	Descripción	Precio (USD / tCO ₂)
Escenario 1 (E1)	Economías emergentes (Perú)	25
Escenario 2 (E2)	Enfoque conservador (CEPAL)	25,83
Escenario 3 (E3)	Escenario alto / ambicioso	50.00 – 75.00

Nota: Los precios corresponden a rangos utilizados en economías emergentes y a escenarios conservadores y altos reportados para América Latina y el Caribe (Ferrer et al., 2025).

La valoración económica del carbono almacenado se realizó mediante el método de precios de mercado del carbono, el cual estima el valor monetario potencial del carbono fijado utilizando precios de referencia de mercados voluntarios y regulados. Este enfoque permite expresar los beneficios ambientales en términos comparables para el análisis económico; sin embargo, no es el valor total del servicio ecosistémico, dado que depende de las variaciones del mercado del carbono y no incluye otros beneficios ambientales asociados ni los costos de certificación requeridos para la comercialización de créditos de carbono.

3.4.5. Análisis estadístico

Debido al tamaño reducido de la muestra ($n = 2$ parcelas por sistema) y al carácter no experimental del estudio, los resultados se analizaron mediante un enfoque descriptivo–comparativo, evitando realizar inferencias estadísticas generalizables.

Se priorizó la comparación de la biomasa aérea, el carbono almacenado y el dióxido de carbono equivalente entre los dos sistemas agroforestales de café evaluados (SAF 1 y SAF 2). Para ello, se realizó un análisis descriptivo exploratorio considerando medidas de tendencia central y dispersión (media y desviación estándar).

Debido al tamaño muestral limitado, no fue apropiado aplicar pruebas formales de normalidad, como Shapiro–Wilk o Kolmogórov–Smirnov. El comportamiento de los datos se evaluó mediante inspección gráfica exploratoria, utilizando histogramas con fines exclusivamente descriptivos.

El procesamiento y organización de la información se realizaron en Microsoft Excel, que permitió el cálculo de estadísticos descriptivos, la elaboración de gráficos exploratorios y la sistematización de los resultados. Por consiguiente, las comparaciones entre sistemas agroforestales se interpretan como tendencias observadas en las parcelas evaluadas y no como inferencias estadísticas generalizables a otros contextos productivos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cuantificar la biomasa aérea existente en los sistemas agroforestales de café.

Debido al tamaño muestral reducido y al diseño no experimental del estudio, los resultados se presentan como comparaciones descriptivas entre las parcelas evaluadas, sin inferencias estadísticas generalizables.

La biomasa aérea estimada por parcela evidencia que, en ambos sistemas agroforestales evaluados, el componente café es el principal reservorio de biomasa, superando ampliamente a los componentes arbóreo y arbustivo–herbáceo (Tabla 3). En las parcelas del sistema SAF 1, la biomasa aérea total varió entre 266,80 y 301,24 t ha⁻¹, mientras que en el sistema SAF 2 osciló entre 283,89 y 337,37 t ha⁻¹.

Estas diferencias pueden estar asociadas a variaciones estructurales como a la densidad de siembra, el desarrollo vegetativo del cultivo de café y la distribución de los árboles de sombra, factores que influyen directamente en la acumulación de biomasa aérea dentro de cada sistema agroforestal.

Tabla 3. Biomasa aérea estimada por parcela y componente en sistemas agroforestales de café en la localidad de Río Tigre.

Parcela	Sistema	Árboles (t ha ⁻¹)	Café (t ha ⁻¹)	Arb/Herb (t ha ⁻¹)	Biomasa aérea total (t ha ⁻¹)
JAN-A1	SAF1	6,19	257,63	2,98	266,80
JAN-A2	SAF1	5,39	293,68	2,17	301,24
PGF-A1	SAF2	3,33	332,74	1,30	337,37
PGF-A2	SAF2	3,93	278,15	1,80	283,89

Nota: JAN-A1 y JAN-A2 corresponden a las parcelas temporales de evaluación instaladas en el sistema agroforestal de café SAF 1 (propietaria: Julia Avila Nieves), mientras que PGF-A1 y PGF-A2 corresponden a las parcelas temporales de evaluación del sistema SAF 2 (propietario: Pascual Gerónimo Figueroa). La biomasa aérea total corresponde a la suma de los componentes arbóreo, café y arbustivo–herbáceo, expresada en toneladas por hectárea (t ha⁻¹).

Precisar que, estos resultados permitieron analizar la composición estructural de la biomasa aérea y el rol relativo de cada componente vegetal dentro del funcionamiento productivo y ecológico de los sistemas agroforestales evaluados. La elevada participación del café en la biomasa aérea muestra una predominancia del cultivo principal dentro de los sistemas evaluados, mientras que la presencia, aunque menor, de los componentes arbóreo y arbustivo–herbáceo suman complejidad estructural, estabilidad ecológica y potencial de provisión de servicios ecosistémicos complementarios.

La biomasa aérea total estimada en los sistemas agroforestales evaluados (266,80 a 337,37 t ha⁻¹) se sitúa dentro del rango superior reportado para sistemas agroforestales con café en el Perú, lo que muestra un potencial productivo y de acumulación de carbono en las

parcelas evaluadas. Clemente (2021) documentó stocks de biomasa aérea superiores a 280 t ha⁻¹ en sistemas agroforestales, mientras que Hurtado (2020) reportó valores promedio cercanos a 428,55 t ha⁻¹ en sistemas agroforestales (café y forestales) con manejo intensivo y mayor densidad arbórea. Resulta que, los valores obtenidos en el presente estudio reflejan sistemas altamente productivos, con una acumulación de biomasa predominantemente asociada al cultivo de café.

La dominancia del componente café, asociado a la alta densidad del cafetal y menor presencia de árboles de sombra, es similar a lo reportado por Gómez (2022) y Díaz (2019), quienes asocian este patrón con esquemas de manejo orientados a maximizar el rendimiento del cultivo principal más que a la diversificación estructural. Este tipo de componente vegetativo implica que la mayor parte de la biomasa y del carbono asociado se encuentra en tejidos de renovación relativamente rápida, lo que diferencia a estos sistemas agroforestales con mayor proporción de biomasa leñosa, donde el carbono presenta mayor estabilidad temporal. Clemente (2022) advierte que sistemas dominados por biomasa del café pueden presentar mayor vulnerabilidad del carbono almacenado frente a prácticas de manejo agrícola.

Los valores de biomasa aérea registrados en ambos sistemas son característicos de sistemas agroforestales con café, donde el cultivo principal es la planta de café que son la parte productiva. González (2018) señala que, una biomasa aérea elevada no depende de la diversidad de las asociaciones entre las vegetaciones, sino a la densidad de siembra en el campo, optimización del espacio productivo orientada al rendimiento del cultivo.

Preciso mencionar que, la biomasa aérea total evidencia lo relevante sobre la heterogeneidad del diseño establecido de los sistemas agroforestales evaluados. La mayor dispersión registrada en el SAF 2 muestra un diseño menos homogéneo entre parcelas, posiblemente asociada a diferencias en el manejo, la edad de las plantaciones y las condiciones micro climáticas del sitio. En cambio, el SAF 1 presenta una distribución más homogénea de la biomasa aérea, lo que refleja prácticas de manejo más adecuado. Este comportamiento coincide con lo descrito por Chappa (2019) y Nieto (2020), quienes señalan que la heterogeneidad del diseño establecido es una característica de los sistemas agroforestales manejados a escala parcelaria.

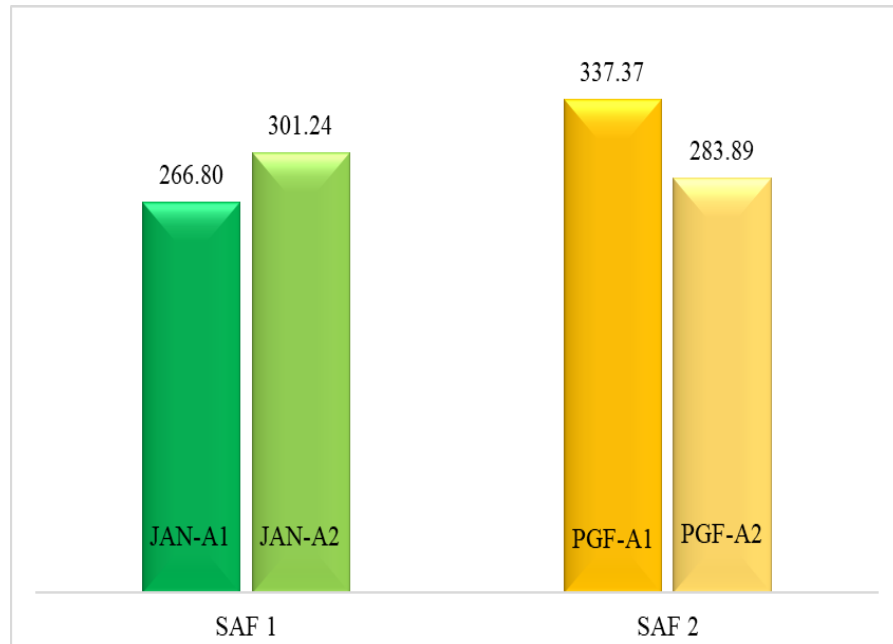


Figura 6. Distribución de la biomasa aérea total en sistemas SAF 1 y SAF 2.

La comparación entre SAF 1 y SAF 2 muestra dos sistemas agroforestales que diferencian de acumulación de biomasa. Mientras el SAF 2 alcanza mayores valores promedio de biomasa aérea total, principalmente por el componente café, el SAF 1 presenta una mayor participación relativa del componente arbóreo y del estrato arbustivo–herbáceo. Aunque estas diferencias son cuantitativamente moderadas, ya que una mayor proporción arbórea incrementa la diversidad estructural del sistema y puede contribuir a una mayor estabilidad ecológica y resiliencia frente a cambios ambientales (González, 2018; Clemente, 2021; Sánchez et al., 2025).

En términos de biomasa aérea, el sistema SAF 2 presentó mayores valores promedio en el componente café en comparación con SAF 1; sin embargo, SAF 1 mostró una mayor contribución del componente arbóreo y arbustivo–herbáceo. Estas diferencias reflejan variaciones en la estructura y manejo de los sistemas agroforestales evaluados (Tabla 4).

Tabla 4. Biomasa aérea promedio por componente y sistema agroforestal de café (SAF 1 y SAF 2) en la localidad de Río Tigre.

Sistema	n parcelas	Árboles (t ha ⁻¹)	Café (t ha ⁻¹)	Arb/Herb (t ha ⁻¹)	Biomasa aérea total (t ha ⁻¹)
SAF 1	2	5,79 ± 0,57	275,65 ± 25,49	2,58 ± 0,57	284,02 ± 24,35
SAF 2	2	3,63 ± 0,42	305,45 ± 38,60	1,55 ± 0,36	310,63 ± 37,82

Nota: os valores corresponden a la media ± desviación estándar de la biomasa aérea estimada a partir de dos parcelas por sistema agroforestal. La biomasa aérea total corresponde a la suma de los componentes arbóreo, café y arbustivo–herbáceo, y se expresa en toneladas por hectárea (t ha⁻¹). La desviación estándar refleja la variabilidad entre parcelas dentro de cada sistema agroforestal evaluado.

El análisis de los valores promedio por sistema (Tabla 4) profundiza en las diferencias estructurales y funcionales entre SAF 1 y SAF 2. En términos de biomasa aérea

total, el SAF 2 presentó un valor promedio ligeramente superior ($310,63 \pm 37,82 \text{ t ha}^{-1}$) en comparación con el SAF 1 ($284,02 \pm 24,35 \text{ t ha}^{-1}$), lo que refleja una mayor acumulación de biomasa asociada principalmente al componente café. Así que el SAF 1 resultó con mayor biomasa representado por componente arbóreo ($5,79 \pm 0,57 \text{ t ha}^{-1}$) y del estrato arbustivo–herbáceo ($2,58 \pm 0,57 \text{ t ha}^{-1}$), lo que demuestra una mayor diversidad estructural del sistema.

Estas diferencias se observan en la Figura 7, existiendo una superposición de los rangos de biomasa aérea total entre ambos sistemas, indicando que, pese a las diferencias en los promedios, ambos sistemas existen dentro de un contexto productivo comparable.

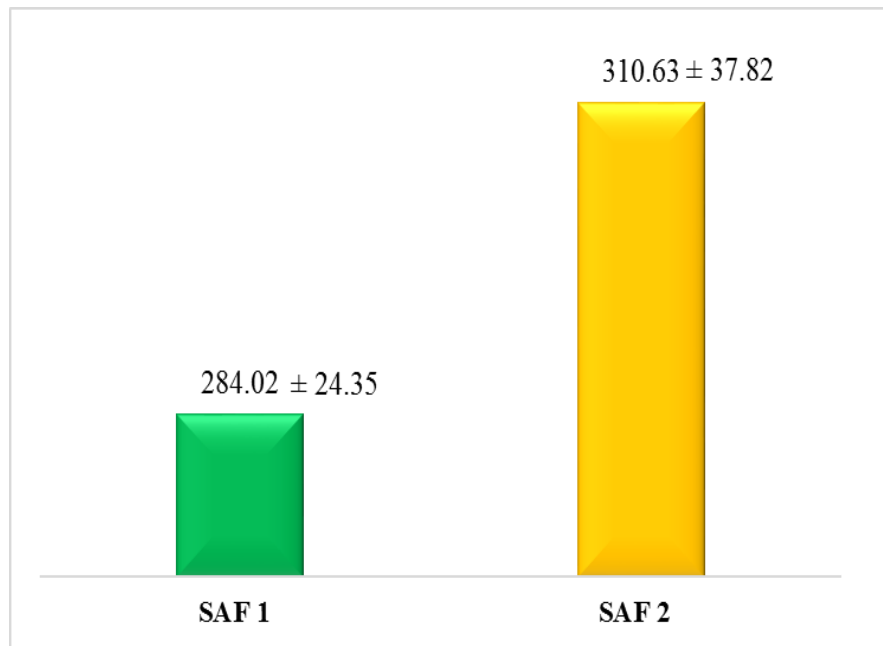


Figura 7. Biomasa aérea total promedio ($\pm$ desviación estándar) en sistemas agroforestales de café SAF 1 y SAF 2.

El SAF 1 mostro mayor contribución respecto al componente arbóreo. Sánchez et al. (2025) señalan que los sistemas agroforestales con mayor presencia arbórea tienden a presentar componentes estructurales, aun cuando la biomasa total sea similar.

Clemente (2022) destaca que una mayor proporción del componente arbóreo, puede favorecer una mayor estabilidad del carbono almacenado y una provisión más sostenida de servicios ecosistémicos en el largo plazo.

Estos resultados evidencian la coexistencia de dos estrategias estructurales diferenciadas: mientras el SAF 2 prioriza la maximización de la biomasa aérea total a través del cultivo principal, el SAF 1 presenta una mayor diversificación estructural, reflejada en la mayor participación de los estratos arbóreo y arbustivo–herbáceo.

De acuerdo con González (2018) y Clemente (2021), este comportamiento es característico de sistemas agroforestales, donde variaciones en la composición del diseño establecido no siempre se traducen en diferencias de la biomasa total, pero sí condicionan la forma en que el carbono se encuentra entre los distintos componentes vegetales.

4.2. Valorar económicamente la fijación del dióxido de carbono en los sistemas agroforestales de café.

- Carbono almacenado en la biomasa aérea

El carbono almacenado en la biomasa aérea por parcela presenta un patrón coherente con la distribución de la biomasa aérea estimada, evidenciando una relación directa entre la acumulación de biomasa y el contenido de carbono en los sistemas agroforestales evaluados (Tabla 5). En ambos sistemas, el componente café concentra la mayor proporción del carbono total almacenado, superando los aportes del componente arbóreo y del estrato arbustivo–herbáceo.

En el sistema SAF 1, el carbono total almacenado varió entre 120,06 y 135,56 tC ha⁻¹, mientras que en el sistema SAF 2 osciló entre 127,75 y 151,82 tC ha⁻¹, resaltando la parcela PGF-A1 como la de mayor almacenamiento de carbono. Este comportamiento responde directamente a la elevada biomasa del cultivo de café, que es la parte productiva y estructural de ambos sistemas agroforestales.

La relación observada entre biomasa aérea y carbono almacenado muestra una elevada eficiencia de captura de carbono en ambos sistemas. Considerando el factor de conversión utilizado (0,45), los valores obtenidos indican que una proporción significativa de la biomasa aérea producida se traduce en carbono almacenado, característica típica de sistemas cafetaleros bien manejados, donde la estructura del cultivo y la densidad de siembra favorecen una alta productividad (Hurtado, 2020).

Tabla 5. Carbono almacenado por parcela y por componente en sistemas agroforestales de café.

Parcela	Sistema	Árboles (tC ha ⁻¹)	Café (tC ha ⁻¹)	Arb/Herb (tC ha ⁻¹)	Carbono total (tC ha ⁻¹)
JAN-A1	SAF1	2,78	115,93	1,34	120,06
JAN-A2	SAF1	2,42	132,15	0,98	135,56
PGF-A1	SAF2	1,50	149,73	0,58	151,82
PGF-A2	SAF2	1,77	125,17	0,81	127,75

Nota: El carbono almacenado fue estimado a partir de la biomasa aérea de cada componente, considerando un factor de conversión estándar (0,45) para biomasa vegetal. El carbono total corresponde a la suma de los componentes arbóreo, café y arbustivo–herbáceo, y se expresa en toneladas de carbono por hectárea (tC ha⁻¹).

Los valores de carbono almacenado oscilan entre 120,06 a 151,82 tC ha⁻¹. En cambio, Clemente (2021) reporta valores superiores a 110 tC ha⁻¹ en sistemas agroforestales,

mientras que Hurtado (2020) reporta valores de 279,83 tC ha⁻¹ en sistemas agroforestales de café con mayor cobertura arbórea. Los resultados obtenidos confirman que los sistemas agroforestales evaluados no solo son de fines productivos, sino que también desempeñan un rol como reservorios de carbono en estos ecosistemas.

Al analizar los valores promedio por sistema agroforestal (Tabla 6), se observa que el SAF 2 presentó un mayor carbono total almacenado en biomasa aérea ($139,78 \pm 17,02$ tC ha⁻¹) a diferencia con el SAF 1 ($127,81 \pm 10,96$ tC ha⁻¹). Esta diferencia está asociada principalmente al mayor aporte del componente café en el SAF 2, mientras que el SAF 1 mantiene una mayor participación relativa del componente arbóreo.

Tabla 6. Carbono almacenado promedio por componente en sistemas agroforestales de café (SAF 1 y SAF 2).

Sistema	n parcelas	Árboles (t ha ⁻¹)	Café (t ha ⁻¹)	Arb/Herb (t ha ⁻¹)	Carbono total (tC ha ⁻¹)
SAF 1	2	$2,60 \pm 0,25$	$124,04 \pm 11,47$	$1,16 \pm 0,26$	$127,81 \pm 10,96$
SAF 2	2	$1,63 \pm 0,19$	$137,45 \pm 17,37$	$0,70 \pm 0,16$	$139,78 \pm 17,02$

Nota: Los valores corresponden a la media $\pm$ desviación estándar del carbono almacenado en la biomasa aérea, estimado a partir de dos parcelas por sistema agroforestal. El carbono se expresa en toneladas de carbono por hectárea (tC ha⁻¹) y se calculó a partir de la biomasa aérea de los componentes arbóreo, café y arbustivo-herbáceo. El carbono total es la suma de los tres componentes. La desviación estándar refleja la variabilidad entre parcelas dentro de cada sistema agroforestal.

De manera práctica, estos sistemas agroforestales muestran la coexistencia de dos estrategias estructurales diferenciadas: el SAF 2 maximiza el almacenamiento de carbono a través del cultivo principal, mientras que el SAF 1 presenta una estructura más diversificada, con una mayor proporción de carbono almacenado en tejidos leñosos. Clemente (2022) señala que el carbono almacenado en componentes arbóreos presenta mayores tiempos de residencia, por lo que sistemas con una mayor participación arbórea podrían ofrecer una mayor estabilidad del carbono en el largo plazo, aun cuando los valores totales sean ligeramente inferiores.

Finalmente, el carbono almacenado en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales evaluados muestra que estos sistemas pueden desempeñar una función productiva, sino que también desempeñan un rol estratégico como sumideros de carbono a escala local, sentando una base sólida para el análisis posterior del CO₂ equivalente fijado y su valoración económica.

- CO₂ equivalente fijado en la biomasa aérea

La conversión del carbono almacenado en biomasa aérea a dióxido de carbono equivalente (CO₂e) es expresar los resultados en una métrica directamente comparable con los procesos de mitigación del cambio climático y ampliamente utilizada en evaluaciones ambientales y económicas. Este procedimiento facilita la interpretación del aporte de los

sistemas agroforestales evaluados en términos de reducción potencial de gases de efecto invernadero.

A nivel de parcela (Tabla 7), el CO₂e total varió entre 439,92 y 496,71 tCO₂e ha⁻¹ en el sistema SAF 1, mientras que en el sistema SAF 2 osciló entre 468,10 y 556,29 tCO₂e ha⁻¹, manteniendo un patrón consistente con la distribución del carbono almacenado en biomasa aérea. En particular, la parcela PGF-A1 presentó el mayor valor absoluto de CO₂e, asociado a su mayor biomasa aérea y mayor contenido de carbono previamente identificado.

Tabla 7. CO₂ equivalente fijado por parcela y por componente en sistemas agroforestales de café.

Parcela	Sistema	Árboles (tCO ₂ e ha ⁻¹)	Café (tCO ₂ e ha ⁻¹)	Arb/Herb (tCO ₂ e ha ⁻¹)	CO ₂ equivalente total (tCO ₂ e ha ⁻¹)
JAN-A1	SAF1	10,20	424,81	4,91	439,92
JAN-A2	SAF1	8,88	484,24	3,58	496,71
PGF-A1	SAF2	5,50	548,65	2,14	556,29
PGF-A2	SAF2	6,48	458,64	2,98	468,10

Nota: El CO₂e fue estimado a partir del carbono almacenado en la biomasa aérea, utilizando un factor de conversión de 3,6642, que es la relación estequiométrica entre el carbono y el dióxido de carbono. El CO₂e total corresponde a la suma de los componentes arbóreo, café y arbustivo–herbáceo, y se expresa en toneladas de CO₂e por hectárea (tCO₂e ha⁻¹).

Los valores superiores del componente café en el CO₂e fijado refleja directamente su elevada contribución al carbono almacenado. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en sistemas agroforestales cafetaleros, donde la densidad del cultivo y su manejo influyen en el potencial de mitigación climática (Clemente, 2021; Hurtado, 2020).

A nivel promedio por sistema (Tabla 8), el SAF 2 registró un mayor CO₂e total (512,20 ± 62,35 tCO₂e ha⁻¹) en comparación con el SAF 1 (468,31 ± 40,16 tCO₂e ha⁻¹). Por tanto, el SAF 1 mostró una mayor participación relativa del componente arbóreo, lo que evidencia una distribución del carbono más equilibrada entre estratos.

Tabla 8. Dióxido de carbono equivalente (CO₂e) promedio por componente en sistemas agroforestales de café (SAF 1 y SAF 2).

Sistema	n parcelas	Árboles (tCO ₂ ha ⁻¹)	Café (tCO ₂ ha ⁻¹)	Arb/Herb (tCO ₂ ha ⁻¹)	CO ₂ equivalente total (tCO ₂ ha ⁻¹)
SAF 1	2	9,54 ± 0,93	454,52 ± 42,03	4,25 ± 0,94	468,31 ± 40,16
SAF 2	2	5,99 ± 0,70	503,65 ± 63,65	2,56 ± 0,59	512,20 ± 62,35

Nota: Los valores corresponden a la media ± desviación estándar del dióxido de carbono equivalente (CO₂e) almacenado en la biomasa aérea, estimado a partir de dos parcelas por sistema agroforestal. El CO₂ equivalente se calculó a partir del carbono almacenado utilizando el factor de conversión 3,6642 (IPCC). El CO₂ equivalente total es la suma de los componentes arbóreo, café y arbustivo–herbáceo, y funcionan como la base para la posterior valoración económica de la fijación de carbono en los sistemas agroforestales evaluados.

Desde el punto de vista de la mitigación climática, los valores de CO₂e estimados en ambos sistemas se sitúan dentro de rangos elevados para sistemas agroforestales cafetaleros en contextos tropicales. Estudios previos en el Perú reportan magnitudes

comparables, destacando que la combinación entre densidad del cultivo, edad del sistema y presencia de árboles de sombra condiciona el potencial de fijación de CO₂e (Clemente, 2021; Hurtado, 2020).

Es preciso indicar, que el CO₂e estimado es el almacenamiento potencial de carbono en biomasa aérea bajo el supuesto de permanencia temporal del carbono en el sistema agroforestal. Así que, los valores obtenidos se utilizan con fines comparativos y analíticos, más que como una estimación directa de créditos de carbono comercializables, alineándose con enfoques académicos recomendados por el IPCC.

- Valoración económica de la fijación de CO₂ equivalente

Para estimar el valor económico del CO₂e almacenado en la biomasa aérea, se estimó mediante el método de precios de mercado del carbono, considerando tres escenarios de precio previamente definidos en la metodología (E1, E2 y E3), con fines académicos y comparativos (Ferrer et al., 2025). Estos escenarios analizan cómo varía el valor económico estimado bajo supuestos de precios en mercado regulados y voluntarios.

La Tabla 9 muestra resultados que la parcela PGF-A1, correspondiente al sistema SAF 2, tiene mayores beneficios económicos potenciales bajo los tres escenarios evaluados, con valores que oscilan entre USD 13 907 en el escenario base (E1) y USD 41 722 en el escenario alto (E3).

Este comportamiento responde directamente a la mayor acumulación de CO₂e previamente identificada en dicha parcela, manteniendo una relación proporcional entre biomasa aérea, carbono almacenado y valoración económica del servicio ecosistémico de mitigación climática. En cambio, las parcelas del SAF 1 presentan valores inferiores, aunque igualmente importantes desde la perspectiva enfoque ambiental y económica.

Tabla 9. Valoración económica del dióxido de carbono equivalente (CO₂e), bajo tres escenarios de precio.

Parcela	Sistema	CO ₂ e total (tCO ₂ ha ⁻¹)	E1: USD 25/ tCO ₂ ha ⁻¹	E2: USD 25.83/ tCO ₂ ha ⁻¹	E3: USD 50–75/ tCO ₂ ha ⁻¹
JAN-A1	SAF1	439,92	\$10 998	\$11 363	\$21 996 - \$32 994
JAN-A2	SAF1	496,71	\$12 418	\$12 830	\$24 835 - \$37 253
PGF-A1	SAF2	556,29	\$13 907	\$14 369	\$27 814 - \$41 722
PGF-A2	SAF2	468,10	\$11 703	\$12 091	\$23 405 - \$35 108

Nota: E1, E2 y E3 corresponden a escenarios de precio del carbono definidos previamente en el texto: E1 (economías emergentes, USD 25/tCO₂e), E2 (enfoque conservador, USD 25,83/tCO₂e) y E3 (escenario alto, USD 50–75/tCO₂e). La valoración económica se estimó a partir del CO₂ equivalente almacenado en la biomasa aérea total (Ferrer et al., 2025).

De manera complementaria, se observa que el SAF 2 presenta consistentemente un mayor valor económico potencial del CO₂ equivalente fijado en comparación con el SAF 1, independientemente del escenario de precio considerado (Tabla 10).

Tabla 10. Valoración económica promedio del dióxido de carbono equivalente (CO₂e) almacenado en biomasa aérea por sistema agroforestal de café.

Parcela	Sistema	CO ₂ e total (tCO ₂ e ha ⁻¹)	E1: USD 25/ tCO ₂ ha ⁻¹	E2: USD 25.83/ tCO ₂ ha ⁻¹	E3: USD 50–75/ tCO ₂ ha ⁻¹
SAF 1	2	468,31	\$11 708	\$12 096	\$23 416 - \$35 123
SAF 2	2	512,20	\$12 805	\$13 230	\$25 610 - \$38 415

Nota: E1, E2 y E3 corresponden a escenarios de precio del carbono definidos previamente en el texto: E1 (economías emergentes, USD 25/tCO₂), E2 (enfoque conservador, USD 25,83/tCO₂) y E3 (escenario alto, USD 50–75/tCO₂). La valoración económica se estimó a partir del CO₂ equivalente almacenado en la biomasa aérea total Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Ferrer et al., 2025).

Bajo el escenario base (E1), el SAF 2 alcanza un valor aproximado de USD 12 805 por hectárea, frente a USD 11 708 por hectárea del SAF 1. Esta diferencia se incrementa progresivamente en los escenarios conservador y alto, mostrando que sistemas con mayor acumulación de biomasa aérea y CO₂e presentan una mayor sensibilidad positiva frente al incremento de los precios del carbono.

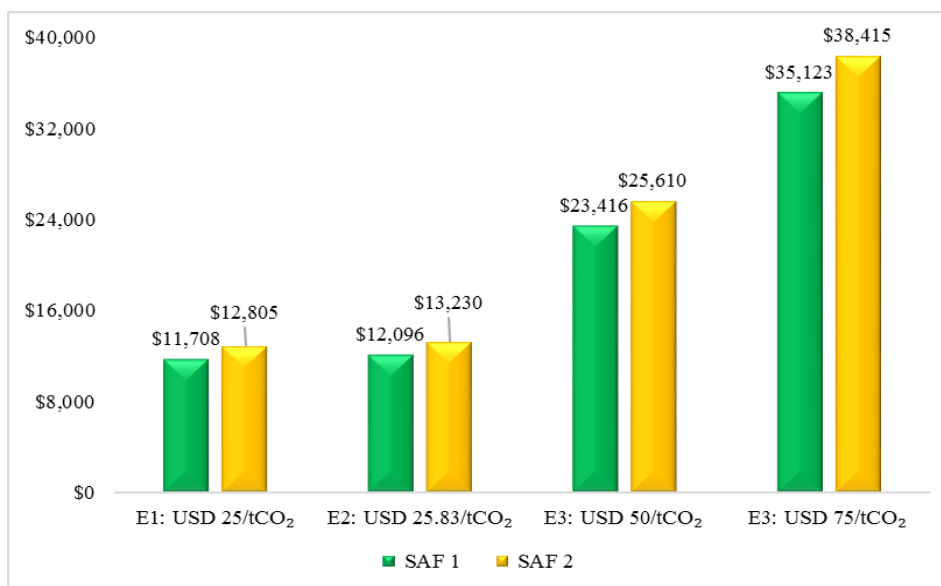


Figura 8. Comparación del valor económico estimado de la fijación de CO₂e entre sistemas agroforestales de café (SAF 1 y SAF 2) bajo distintos escenarios de precio del carbono.

Nota: El valor económico se estimó a partir del CO₂e total por sistema y precios de referencia del carbono. Fuente: (Ferrer et al., 2025).

Es preciso resaltar, que los valores económicos obtenidos corresponden al método de precios de mercado del carbono y deben interpretarse como estimaciones referenciales, sujetas a la volatilidad de los mercados y a la necesidad de procesos de certificación, adicionalidad y permanencia para su comercialización efectiva. Así que, los valores estimados

son los valores económicos teóricos del servicio ecosistémico de fijación de CO₂, y deben interpretarse como una herramienta analítica para dimensionar el aporte ambiental de los sistemas agroforestales de café, más que como una estimación de beneficios financieros directos.

Desde una posición política pública y planificación ambiental, estos resultados aportan información sobre el rol potencial de los sistemas agroforestales de café en el cumplimiento de objetivos climáticos y de desarrollo sostenible. La diferencia en el valor económico del CO₂e entre el SAF 1 y el SAF 2 del orden de USD 1,100 por hectárea en el escenario base y creciente bajo escenarios de precios más elevados evidencia la sensibilidad del valor del servicio ecosistémico frente a las variaciones del precio del carbono. En concordancia, Ferrer et al. (2025) señalan que, en economías emergentes como el Perú, este tipo de valoraciones sirve para sustentar el diseño de incentivos ambientales, esquemas de pagos por servicios ecosistémicos y estrategias de promoción de la agroforestería como solución basada en la naturaleza.

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema agroforestal SAF2, a pesar de presentar una menor edad (5 años) en comparación con SAF1 (6 años), registró mayores valores de biomasa aérea, carbono almacenado y fijación de CO₂. Estos resultados evidencian las diferencias que existe en los sistemas agroforestales de acuerdo al diseño de su establecimiento referido a la densidad de siembra y especies vegetales establecidas. El distanciamiento del cultivo de café en SAF2 (1,2 × 2,0 m) podría haber favorecido una mejor distribución de la densidad en la parcela, reduciendo la competencia por luz, agua y nutrientes, lo cual influye en el crecimiento vegetativo. Asimismo, la interacción entre los componentes del sistema agroforestal, entre el cultivo de café y los árboles como sombra puede haber generado condiciones más favorables para la acumulación de biomasa. Por otro lado, la edad del sistema no necesariamente determina una mayor biomasa, ya que esta depende de factores como la densidad de siembra, el manejo agronómico y la eficiencia en el uso de recursos. Finalmente, los resultados muestran que SAF2 presenta una estructura eficiente en términos de producción de biomasa y captura de carbono.

V. CONCLUSIONES

- Se estimó la biomasa aérea, el carbono almacenado y la valoración económica del CO₂e en sistemas agroforestales de café en la localidad de Río Tigre, evidenciando que estos sistemas cumplen una función ambiental como sumideros de carbono y es una alternativa productiva sostenible frente al cambio climático.
- La biomasa aérea total varió entre 266,80 y 337,37 t ha⁻¹, con mayor presencia del cultivo de café como principal componente. El carbono almacenado osciló entre 120,06 y 151,82 tC ha⁻¹ (439,92–556,29 tCO₂e ha⁻¹), evidenciando una relación directa entre biomasa y captura de carbono, así como diferencias entre sistemas, donde el SAF 2 presentó mayores valores.
- La valoración económica del CO₂e fijado presentó valores entre USD 10 998 y USD 41 722 ha⁻¹, evidenciando un potencial económico del servicio ecosistémico de fijación de carbono, dependiente del precio del carbono y útil como base para el diseño de mecanismos de compensación ambiental.

VI. PROPUESTA A FUTURO

- Ampliar la aplicación de la metodología ICRAF a un mayor número de sistemas agroforestales de café en el distrito de Mariano Dámaso Beraún y otras zonas cafetaleras de Huánuco, con el fin de obtener estimaciones representativas de biomasa, carbono y CO₂e a escala territorial.
- Incorporar la evaluación del carbono orgánico del suelo y la necromasa para estimar el stock total de carbono y mejorar la precisión de la valoración del servicio ecosistémico.
- Desarrollar estudios de monitoreo temporal que permitan evaluar la dinámica y permanencia del carbono almacenado en función de la edad del sistema y su manejo.
- Promover sistemas agroforestales de café con mayor diversificación estructural y adecuada gestión del componente arbóreo, orientados a mejorar la captura y estabilidad del carbono.
- Utilizar los resultados de la valoración económica del CO₂e como base para el diseño de mecanismos de incentivos ambientales y pagos por servicios ecosistémicos.

VII. REFERENCIAS

- Arango Sánchez, J. F., Pacheco Figueroa, C. J., & Vargas Marín, L. A. (2023). Valoración económica de los servicios ecosistémicos: una revisión sistemática. *Revista Venezolana De Gerencia*, 28(103), 948-964. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.28.103.3>
- Arévalo, L. A., Alegre, J. C., & Palm, C. A. (2003). *Manual determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú*. Instituto Nacional de Investigación Agraria [INIA].
- Atangana, A., Khasa, D., Chang, S. y Degrande, A. (2014). Definiciones y Clasificación de Sistemas Agroforestales. *Tropical Agroforestry*, 35-47. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7723-1_3
- Barbier, E. B. (2007). Valoración de los servicios ecosistémicos como insumos productivos. *Economic Policy*, 22(49), 177–229. <http://www.jstor.org/stable/4502194>
- Brown, S., y Lugo, A., (1992), Aboveground Biomass Estimates for Tropical Moist Forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia*, 17, 8-18. https://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Other%20side-outro%20lado/Brown%20&%20Lugo%20biomass/Brown%20and%20Lugo%201992-Aboveground%20biomass%20estimates.pdf
- Cabrera N. B. (2016). *Estimación de biomasa aérea de Inga edulis mart. y Coffea arabica L. en el Alto Mayo, San Martín*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2752>
- Congreso de la Republica del Perú. (29 de junio de 214). Ley N° 30215, Ley de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos. *Diario Oficial El Peruano*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-30215.pdf>
- Carbon Neutral +. (2022, 6 de octubre). ¿Qué son los bonos de carbono y qué tipos existen?. Carbononeutralplus. <https://www.carbonneutralplus.com/proyectos-de-bonos-de-carbono-cuales-son-que-tipos-hay/>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Rasking, R., Sutton, P., & Belt, M. (1997)..El valor de los servicios de los ecosistemas y el capital natural del mundo. *Nature*, 387, 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>

- Clemente Arenas, E. R. (2022). Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios - Perú. *Revista Forestal del Perú*, 37(1), 54-68. <https://doi.org/10.21704/rfp.v37i1.1593>
- Clemente Arenas, E. R. (2021). Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú. *Revista Forestal del Perú*, 36(2), 180-196. <https://doi.org/10.21704/rfp.v36i2.1797>
- Chappa, C. E. (2019). *Valoración económica del servicio ambiental por secuestro de carbono en la biomasa aérea de diferentes sistemas agroforestales – en la Región San Martín - Perú*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional de la Universidad. <http://hdl.handle.net/11458/3342>
- Díaz, L. (2019). *Estimación de la captura de carbono en dos sistemas agroforestales de café en la provincia de Rioja, San Martín - Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. Repositorio Institucional Digital Universidad Católica Sedes Sapientiae . <https://hdl.handle.net/20.500.14095/746>
- Fernandes, C., Matsumoto, S. & Fernandes, V. (2018). Stock de carbono en el desarrollo de diferentes diseños de sistemas agroforestales biodiversos. *Revista Brasileira de Ingeniería Agrícola y Ambiental*, 20(10), 720-725. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p720-725>
- Freeman, A. M., Herrigues, A. J. & Kling C. L. (2003). *The measurement of environmental and resource values*. Resources For The Future. <http://econdse.org/wp-content/uploads/2016/07/Freeman-Herriges-Kling-2014.pdf>
- Ferrer, J., De Miguel, C., Lorenzo, S., & Alatorre, J. E. (2025). *Panorama de las políticas de precios del carbono en América Latina y el Caribe 2025: Análisis de su efectividad y lineamientos para su implementación*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/83160-panorama-politicas-precios-carbono-america-latina-caribe-2025-analisis-su>
- Gómez, F. A. (2022). *Estimación de carbono almacenado en sistemas Agroforestales de Café, Distrito de Anco - La Mar, Región Ayacucho, 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2610>

- González, J. F. (2018). *Carbono almacenado en sistemas agroforestales de Coffea arabica L. "café" de 4 y 7 años en relación a la gradiente altitudinal, Huánuco*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1476>
- Hernández Ramos, J., Santos-Posadas, H. M. D. L., Valdez Lazalde, J. R., Tamarit Urias, J. C., Ángeles Pérez, G., Hernández Ramos, A., Peduzzi, A., & Carrero, O. (2017). Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia*, 51(8), 921-938. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30253817008.pdf>
- Hurtado, P. J. (2020). *Reserva de biomasa y captura del carbono de un sistema agroforestal de Coffea arabica L. y Eucalyptus saligna, Naranjillo, 2018*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Martín. <http://hdl.handle.net/11458/3765>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2015). *Reglamento para la gestión de las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales* (Decreto Supremo N.º 018-2015-MINAGRI). Gobierno del Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-sanmartin/archivos/public/docs/reglamento-para-la-gestion-de-las-plantaciones-forestales-y-los-sistemas-agroforestales.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2016). Guía de valoración económica del patrimonio natural. Ministerio del Ambiente [MINAM]. <https://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/10/GVEPN-30-05-16-baja.pdf>
- Nieto, P. D. (2020). *Valoración económica de la reserva de carbono en biomasa aérea mediante la aplicación de Fotogrametría y Teledetección – San Martín, 2018*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Martín. <http://hdl.handle.net/11458/4536>
- Nordhaus, W. (2014). Estimaciones del costo social del carbono: conceptos y resultados del modelo DICE-2013R y enfoques alternativos. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1, 273 - 312. <https://doi.org/10.1086/676035>
- Notaro, K., Medeiros, É., Duda, G., Silva, A., & Moura, P. (2014). Agroforestry systems, nutrients in litter and microbial activity in soils cultivated with coffee at high altitude. *Scientia Agricola*, 71(2), 87-95. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000200001>

- Oijen, M., Dauzat, J., Harmand, J., Lawson, G., & Vaast, P. (2010). Sistemas agroforestales de café en Centroamérica: I. Una revisión de información cuantitativa sobre procesos fisiológicos y ecológicos. *Agroforestry Systems*, 80, 341-359. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9294-y>
- Ponce Vaca, L. A., Acuña Velázquez, I. R., & Proaño Ponce., W. P. (2018). El sistema agroforestal cafetalero. Su importancia para la seguridad agroalimentaria y nutricional en Ecuador. *Revista Cubana De Ciencias Forestales*, 6(1), 116–129. Recuperado a partir de <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/300>
- Pusare, A. L. (2021). *Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (Coffea arabica L.) del distrito de Chontabamba, provincia Oxapampa, región Pasco – 2020*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2364>
- Plata Fajardo, A. M., Timofeiczky Junior, R., Silva, Z. A. G. P. da G. e, Silva, J. C. G. L. da, Juazeiro dos Santos, A., & Mosquera Agudelo, P. A. (2020). Viabilidad económica de proyectos REDD+ en la Amazonia brasileña. *Madera Y Bosques*, 26(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611761>
- Quirós Badilla, D F., Solórzano Thompson, J., Paniagua Molinay, J. & Solano Pereira, T. (2024). Revisión literaria de valoración económica de soluciones basadas en naturaleza en agricultura. *Perpectivas rurales*, 22(44), 1-30. <https://doi.org/10.15359/prme.22-44.6>
- Rügnitz Tito, M., Chacón León, M., & Porro, R. (2009). *Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales*. Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF)/Consórcio Iniciativa Amazônica (IA) <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/B16293.pdf>
- Sánchez Tello, S., Núñez Figueroa, M., Romero Rojas, J. A., Romero Montenegro, S. J., & Vélchez Gíl, B. H. (2025). Cuantificación de Carbono en la Biomasa Aérea de Dos Sistemas Agroforestales (SAFS) en las Provincias de San Ignacio y Jaén - Cajamarca. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(2), 2248-2267. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.17057

- Sarkar, S. & Das, D. k. (2020). Tree biomass and carbon stock assessment in different agroforestry system trees. *International Journal of Chemical Studies*, 8(4), 3858-3861. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i4aw.10251>
- Sistema Europeo de Negocios de CO₂. (2024, 2 de abril). *Precio CO₂*. Sistema Europeo de Negocios de CO₂ [Sendeco2]. <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- Solidaridad Network. (2023, 8 de noviembre). *Asómbtrate: Productores cafetaleros de San Martín recibieron hasta USD 2470 (\$/9000) por venta de bonos de carbono*. Solidaridad Network. <https://solidaridadlatam.org/news/asombrate-productores-cafetaleros-recibieron-pagos-por-bonos-de-carbono/>
- Solidaridad Network. (2023, 18 de septiembre). Bonos y mercados de carbono: una puerta a beneficios para pequeños agricultores. Solidaridad Network. <https://solidaridadlatam.org/news/bonos-mercados-de-carbono/>
- Soto Pinto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Ferrer, G., & Jong, B. (2009). Captura de carbono mediante agroforestería en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Agroforestry Systems*, 78, 39-51. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9247-5>
- Suárez, D. 2004. *Cuantificación económica del servicio ambiental, almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la 72 Comarca Yassic sur, Matagela. Nicaragua*. [Tesis de Maestría, Centro Agronomico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio Institucional Centro Agronomico Tropical de Investigación y Enseñanza Catie. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3735>
- Tovar Zerpa, F. G. & Rojas López, J. J. (2023). La Trilogía «Sistemas Agroforestales agroecología- Agricultura Familiar»: Una Referencia Válida para la Transformación de los Sistemas Alimentarios Agroindustriales. *Agrolimentaria*, 28(55), 231-242. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8879569.pdf>
- Valencia, V., West, P., Sterling, E., García-Barrios, L., & Naeem, S. (2015). El uso del conocimiento de los agricultores en el manejo agroforestal del café: implicaciones para la conservación de la biodiversidad arbórea. *Ecosphere*, 6(7) , 1-17. <https://doi.org/10.1890/ES14-00428.1>
- Valencia, V., García-Barrios, L., West, P., Sterling, E., & Naeem, S. (2014). El papel de la agroforestería del café en la conservación de la diversidad arbórea y la composición comunitaria de los bosques nativos en una Reserva de la Biosfera. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 189(1), 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.024>

- Zhou, P. & Wang, M. (2016). Asignación de emisiones de dióxido de carbono: una revisión. *Ecological Economics*, 125, 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.001>
- Zomer, R., Neufeldt, H., Xu, J., Ahrends, A., Bossio, D., Trabucco, A., Noordwijk, M. y Wang, M. (2016). Cobertura arbórea global y carbono de la biomasa en tierras agrícolas: La contribución de la agroforestería a los presupuestos de carbono globales y nacionales.. *Scientific reports*, 6, 29987. <https://doi.org/10.1038/srep29987>

ANEXOS

Anexo 1. Registro fotográfico de campo



Figura 9. Delimitación de la parcela de muestreo.



Figura 10. Señalización del área de estudio.



Figura 11. Medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) en especies arbóreas.



Figura 12. Marcación de individuos arbóreos evaluados.



Figura 13. Medición de tallos de café mediante vernier.



Figura 14. Muestreo del componente arbustivo–herbáceo.



Figura 15. Pesaje de muestras de biomasa en laboratorio.



Figura 16. Secado de muestras de biomasa en estufa.

Anexo 2. Datos dasométricos y estimación de biomasa del componente arbóreo.

Tabla 11. Datos dasométricos, biomasa aérea, carbono almacenado y CO₂ equivalente del componente arbóreo en sistemas agroforestales de café (parcelas JAN-A1, JAN-A2, PGF-A1 y PGF-A2).

ID_Parcela	Sistema	Árbol_ID	Especie	Dap (cm)	Altura (m)	log10(BA)	Biomasa (kg)	Biomasa (t ha ⁻¹)	Carbono (tC ha ⁻¹)	CO ₂ equivalente (tCO ₂ e ha ⁻¹)
JAN-A1	SAF 1	1	Guaba	9,4	8	1,37	23,21	0,23	0,10	0,38
JAN-A1	SAF 1	2	Guaba	11,4	5,6	1,56	36,30	0,36	0,16	0,60
JAN-A1	SAF 1	3	Guaba	10,65	6,4	1,49	31,00	0,31	0,14	0,51
JAN-A1	SAF 1	4	Guaba	11,2	8,5	1,54	34,84	0,35	0,16	0,57
JAN-A1	SAF 1	5	Guaba	16,15	6,6	1,91	81,35	0,81	0,37	1,34
JAN-A1	SAF 1	6	Guaba	14,6	8,1	1,81	64,39	0,64	0,29	1,06
JAN-A1	SAF 1	7	Guaba	6,9	7,2	1,05	11,34	0,11	0,05	0,19
JAN-A1	SAF 1	8	Guaba	10,8	6	1,51	32,02	0,32	0,14	0,53
JAN-A1	SAF 1	9	Guaba	11,2	7,9	1,54	34,84	0,35	0,16	0,57
JAN-A1	SAF 1	10	Guaba	8,3	6,2	1,24	17,40	0,17	0,08	0,29
JAN-A1	SAF 1	11	Guaba	11,85	9,1	1,60	39,70	0,40	0,18	0,65
JAN-A1	SAF 1	12	Guaba	14,5	8,6	1,80	63,37	0,63	0,29	1,04
JAN-A1	SAF 1	13	Guaba	16,25	9,8	1,92	82,52	0,83	0,37	1,36
JAN-A1	SAF 1	14	Guaba	11,5	6,7	1,57	37,04	0,37	0,17	0,61
JAN-A1	SAF 1	15	Guaba	10,4	8,3	1,47	29,34	0,29	0,13	0,48
JAN-A2	SAF 1	1	Guaba	9,3	12,5	1,35	22,65	0,23	0,10	0,37
JAN-A2	SAF 1	2	Guaba	10,8	8,2	1,51	32,02	0,32	0,14	0,53
JAN-A2	SAF 1	3	Guaba	12,4	11,8	1,64	44,10	0,44	0,20	0,73
JAN-A2	SAF 1	4	Guaba	11,2	8,54	1,54	34,84	0,35	0,16	0,57
JAN-A2	SAF 1	5	Guaba	15,7	12,9	1,88	76,19	0,76	0,34	1,26
JAN-A2	SAF 1	6	Guaba	11,5	9,5	1,57	37,04	0,37	0,17	0,61
JAN-A2	SAF 1	7	Guaba	9,6	10,4	1,39	24,37	0,24	0,11	0,40
JAN-A2	SAF 1	8	Guaba	8,3	12,8	1,24	17,40	0,17	0,08	0,29
JAN-A2	SAF 1	9	Guaba	14,3	15,8	1,79	61,36	0,61	0,28	1,01
JAN-A2	SAF 1	10	Guaba	9,7	11,5	1,40	24,97	0,25	0,11	0,41
JAN-A2	SAF 1	11	Guaba	7,8	9,12	1,18	15,07	0,15	0,07	0,25
JAN-A2	SAF 1	12	Guaba	12,4	10,8	1,64	44,10	0,44	0,20	0,73
JAN-A2	SAF 1	13	Guaba	10,2	12,4	1,45	28,05	0,28	0,13	0,46
JAN-A2	SAF 1	14	Guaba	13,4	10,3	1,72	52,78	0,53	0,24	0,87
JAN-A2	SAF 1	15	Guaba	9,5	10,8	1,38	23,79	0,24	0,11	0,39
PGF-A1	SAF 2	1	Guaba	18,5	13,2	2,05	111,44	1,11	0,50	1,84
PGF-A1	SAF 2	2	Guaba	11,9	11,1	1,60	40,09	0,40	0,18	0,66
PGF-A1	SAF 2	3	Guaba	11,1	7,9	1,53	34,12	0,34	0,15	0,56
PGF-A1	SAF 2	4	Guaba	8,3	5,7	1,24	17,40	0,17	0,08	0,29
PGF-A1	SAF 2	5	Guaba	13,9	7,5	1,76	57,46	0,57	0,26	0,95
PGF-A1	SAF 2	6	Guaba	15,4	6,9	1,86	72,86	0,73	0,33	1,20
PGF-A2	SAF 2	1	Guaba	7,25	4,87	1,10	12,72	0,13	0,06	0,21
PGF-A2	SAF 2	2	Guaba	13,3	6,72	1,71	51,88	0,52	0,23	0,86

ID_ Parcela	Sistema	Árbol_ID	Especie	Dap (cm)	Altura (m)	log10(BA)	Biomasa (kg)	Biomasa (t ha ⁻¹)	Carbono (tC ha ⁻¹)	CO ₂ e (tCO _{2e} /ha ⁻¹)
PGF-A2	SAF 2	3	Guaba	5,75	6,08	0,87	7,43	0,07	0,03	0,12
PGF-A2	SAF 2	4	Guaba	13,25	8,65	1,71	51,42	0,51	0,23	0,85
PGF-A2	SAF 2	5	Guaba	12,4	9,42	1,64	44,10	0,44	0,20	0,73
PGF-A2	SAF 2	6	Guaba	15,3	8,85	1,86	71,77	0,72	0,32	1,18
PGF-A2	SAF 2	7	Guaba	8,75	6,12	1,29	19,66	0,20	0,09	0,32
PGF-A2	SAF 2	8	Guaba	20,05	15	2,13	134,28	1,34	0,60	2,21

JAN: Propietario de la parcela Julia Avila Nieves

PGF: Propietario de la parcela Pascual Gerónimo Figueroa

Anexo 3. Datos dasométricos y biomasa del cultivo de café.

Tabla 12. Datos dasométricos y estimación de biomasa aérea del cultivo de café en sistemas agroforestales evaluados.

ID_Parcela	Sistema	Café_ID	Especie	D15 (cm)	Altura (m)	ln(B)	Biomasa (kg)
JAN-A1	SAF1	C1	café	4,731	1,7	4,54	93,72
JAN-A1	SAF1	C2	café	5,073	1,45	4,40	81,83
JAN-A1	SAF1	C3	café	4,074	2,4	4,84	125,99
JAN-A1	SAF1	C4	café	2,699	1,5	3,85	46,91
JAN-A1	SAF1	C5	café	2,798	1,9	4,18	65,54
JAN-A1	SAF1	C6	café	3,825	1,9	4,48	88,20
JAN-A1	SAF1	C7	café	3,19	1,47	3,98	53,59
JAN-A1	SAF1	C8	café	2,627	1,2	3,54	34,44
JAN-A1	SAF1	C9	café	2,58	1,5	3,81	44,94
JAN-A1	SAF1	C10	café	2,541	1,7	3,95	51,93
JAN-A1	SAF1	C11	café	2,841	1,9	4,20	66,49
JAN-A1	SAF1	C12	café	2,838	1,75	4,09	59,84
JAN-A1	SAF1	C13	café	4,597	3,4	5,39	219,93
JAN-A1	SAF1	C14	café	3,728	1,9	4,46	86,08
JAN-A1	SAF1	C15	café	2,798	2,7	4,63	102,40
JAN-A1	SAF1	C16	café	3,295	1,5	4,04	56,70
JAN-A1	SAF1	C17	café	2,862	1,8	4,14	62,52
JAN-A1	SAF1	C18	café	2,547	1,7	3,95	52,04
JAN-A1	SAF1	C19	café	3,72	1,7	4,31	74,58
JAN-A1	SAF1	C20	café	2,85	1,9	4,20	66,69
JAN-A1	SAF1	C21	café	2,71	1,5	3,85	47,09
JAN-A1	SAF1	C22	café	2,87	1,5	3,91	49,73
JAN-A1	SAF1	C23	café	2,414	1,6	3,82	45,79
JAN-A1	SAF1	C24	café	2,639	2,5	4,48	87,84
JAN-A1	SAF1	C25	café	2,722	1,6	3,94	51,33
JAN-A1	SAF1	C26	café	2,745	1,6	3,95	51,74
JAN-A1	SAF1	C27	café	2,66	1,5	3,83	46,26
JAN-A1	SAF1	C28	café	3,016	1,7	4,11	61,11
JAN-A1	SAF1	C29	café	2,604	1,6	3,90	49,21
JAN-A1	SAF1	C30	café	2,62	1,48	3,80	44,83
JAN-A1	SAF1	C31	café	3,008	1,27	3,74	42,09
JAN-A1	SAF1	C32	café	3,198	2,8	4,80	121,76
JAN-A1	SAF1	C33	café	2,78	2,4	4,47	87,63
JAN-A1	SAF1	C34	café	3,131	1,5	3,99	54,01
JAN-A1	SAF1	C35	café	4,133	2,1	4,68	107,80
JAN-A1	SAF1	C36	café	3,103	1,3	3,80	44,65
JAN-A1	SAF1	C37	café	2,793	1	3,37	28,96

ID_Parcela	Sistema	Café_ID	Especie	D15 (cm)	Altura (m)	ln(B)	Biomasa (kg)
JAN-A1	SAF1	C38	café	3,945	2,7	4,96	141,92
JAN-A1	SAF1	C39	café	3,568	1,5	4,11	61,15
JAN-A1	SAF1	C40	café	4,26	2,45	4,90	134,94
JAN-A1	SAF1	C41	café	2,5	1,97	4,12	61,66
JAN-A1	SAF1	C42	café	3,632	2,03	4,51	91,33
JAN-A1	SAF1	C43	café	2,503	1,35	3,64	38,20
JAN-A1	SAF1	C44	café	3,65	1,35	4,00	54,66
JAN-A1	SAF1	C45	café	2,545	2,8	4,59	98,01
JAN-A1	SAF1	C46	café	2,845	1,6	3,98	53,53
JAN-A1	SAF1	C47	café	2,977	1,8	4,17	64,90
JAN-A1	SAF1	C48	café	3,138	1,9	4,29	73,08
JAN-A1	SAF1	C49	café	2,57	2,2	4,29	72,82
JAN-A1	SAF1	C50	café	4,06	2,53	4,90	134,28
JAN-A1	SAF1	C51	café	4,57	2,81	5,15	171,69
JAN-A1	SAF1	C52	café	3,181	1,2	3,72	41,30
JAN-A1	SAF1	C53	café	3,078	1,7	4,13	62,30
JAN-A1	SAF1	C54	café	2,13	2,12	4,06	58,13
JAN-A1	SAF1	C55	café	4,162	1,68	4,40	81,74
JAN-A1	SAF1	C56	café	2,63	1,9	4,12	61,79
JAN-A1	SAF1	C57	café	2,957	1,3	3,75	42,66
JAN-A1	SAF1	C58	café	2,785	1,8	4,11	60,92
JAN-A1	SAF1	C59	café	4,711	2,3	4,92	137,03
JAN-A1	SAF1	C60	café	2,878	1,6	3,99	54,12
JAN-A1	SAF1	C61	café	4,074	2,4	4,84	125,99
JAN-A1	SAF1	C62	café	2,699	1,5	3,85	46,91
JAN-A1	SAF1	C63	café	2,798	1,9	4,18	65,54
JAN-A1	SAF1	C64	café	3,825	1,9	4,48	88,20
JAN-A1	SAF1	C65	café	3,19	1,47	3,98	53,59
JAN-A1	SAF1	C66	café	2,627	1,2	3,54	34,44
JAN-A1	SAF1	C67	café	2,58	1,5	3,81	44,94
JAN-A1	SAF1	C68	café	2,78	2,4	4,47	87,63
JAN-A1	SAF1	C69	café	3,131	1,5	3,99	54,01
JAN-A1	SAF1	C70	café	4,133	2,1	4,68	107,80
JAN-A1	SAF1	C71	café	3,103	1,3	3,80	44,65
JAN-A1	SAF1	C72	café	2,793	1	3,37	28,96
JAN-A1	SAF1	C73	café	3,945	2,7	4,96	141,92
JAN-A1	SAF1	C74	café	3,568	1,5	4,11	61,15
JAN-A1	SAF1	C75	café	4,26	2,45	4,90	134,94
JAN-A1	SAF1	C76	café	2,545	2,8	4,59	98,01
JAN-A1	SAF1	C77	café	2,845	1,6	3,98	53,53
JAN-A1	SAF1	C78	café	2,977	1,8	4,17	64,90
JAN-A1	SAF1	C79	café	3,138	1,9	4,29	73,08
JAN-A1	SAF1	C80	café	2,57	2,2	4,29	72,82

ID_Parcela	Sistema	Café_ID	Especie	D15 (cm)	Altura (m)	ln(B)	Biomasa (kg)
JAN-A1	SAF1	C81	café	4,06	2,53	4,90	134,28
JAN-A1	SAF1	C82	café	4,57	2,81	5,15	171,69
JAN-A1	SAF1	C83	café	3,181	1,2	3,72	41,30
JAN-A1	SAF1	C84	café	3,078	1,7	4,13	62,30
JAN-A1	SAF1	C85	café	2,13	2,12	4,06	58,13
JAN-A1	SAF1	C86	café	4,162	1,68	4,40	81,74
JAN-A2	SAF1	C1	Café	3,46	2,55	4,76	116,52
JAN-A2	SAF1	C2	Café	6,5	3,6	5,79	328,65
JAN-A2	SAF1	C3	Café	2,56	2,04	4,19	65,92
JAN-A2	SAF1	C4	Café	3,5	2,23	4,60	99,35
JAN-A2	SAF1	C5	Café	2,24	1,94	4,00	54,48
JAN-A2	SAF1	C6	Café	3,8	1	3,66	38,79
JAN-A2	SAF1	C7	Café	3,2	1,4	3,92	50,52
JAN-A2	SAF1	C8	Café	2,8	2,3	4,43	83,59
JAN-A2	SAF1	C9	Café	2,58	2,01	4,18	65,17
JAN-A2	SAF1	C10	Café	3,4	1,4	3,98	53,51
JAN-A2	SAF1	C11	Café	2,1	1,5	3,61	36,96
JAN-A2	SAF1	C12	Café	3,4	2,2	4,55	95,00
JAN-A2	SAF1	C13	Café	2,6	1,5	3,81	45,27
JAN-A2	SAF1	C14	Café	3,1	3,4	5,02	151,26
JAN-A2	SAF1	C15	Café	2,6	1,6	3,89	49,14
JAN-A2	SAF1	C16	Café	3	2,7	4,70	109,41
JAN-A2	SAF1	C17	Café	2,7	3,2	4,81	122,83
JAN-A2	SAF1	C18	Café	2,5	2,8	4,57	96,36
JAN-A2	SAF1	C19	Café	2,6	1,4	3,73	41,47
JAN-A2	SAF1	C20	Café	2,2	1,7	3,81	45,28
JAN-A2	SAF1	C21	Café	2,9	3,3	4,92	136,70
JAN-A2	SAF1	C22	Café	3,2	2,9	4,85	127,38
JAN-A2	SAF1	C23	Café	2,6	1,4	3,73	41,47
JAN-A2	SAF1	C24	Café	2,8	3,7	5,03	152,89
JAN-A2	SAF1	C25	Café	4,2	2,6	4,97	143,57
JAN-A2	SAF1	C26	Café	3,8	2,9	5,01	149,97
JAN-A2	SAF1	C27	Café	2,4	1,8	3,97	52,89
JAN-A2	SAF1	C28	Café	2,6	1,4	3,73	41,47
JAN-A2	SAF1	C29	Café	2,6	1,2	3,53	34,10
JAN-A2	SAF1	C30	Café	3,3	1,26	3,82	45,50
JAN-A2	SAF1	C31	Café	2,7	2,33	4,41	82,09
JAN-A2	SAF1	C32	Café	2,1	3,5	4,69	108,40
JAN-A2	SAF1	C33	Café	2,5	1,37	3,66	38,87
JAN-A2	SAF1	C34	Café	2,8	1,4	3,80	44,50
JAN-A2	SAF1	C35	Café	2,9	2,48	4,55	95,10
JAN-A2	SAF1	C36	Café	2,4	1,5	3,74	41,96
JAN-A2	SAF1	C37	Café	3,1	1,8	4,21	67,45

ID_Parcela	Sistema	Café_ID	Especie	D15 (cm)	Altura (m)	ln(B)	Biomasa (kg)
JAN-A2	SAF1	C38	Café	3,8	3,2	5,14	169,94
JAN-A2	SAF1	C39	Café	2,3	1,62	3,79	44,43
JAN-A2	SAF1	C40	Café	2,8	2,2	4,37	79,00
JAN-A2	SAF1	C41	Café	2,1	1,42	3,54	34,47
JAN-A2	SAF1	C42	Café	3,5	2,27	4,62	101,62
JAN-A2	SAF1	C43	Café	4,2	2,4	4,87	129,69
JAN-A2	SAF1	C44	Café	3,2	2,66	4,74	114,14
JAN-A2	SAF1	C45	Café	2,4	1,95	4,07	58,55
JAN-A2	SAF1	C46	Café	2,7	1,6	3,93	50,93
JAN-A2	SAF1	C47	Café	2,9	1,2	3,63	37,83
JAN-A2	SAF1	C48	Café	2	1,3	3,38	29,42
JAN-A2	SAF1	C49	Café	3,6	1,3	3,94	51,42
JAN-A2	SAF1	C50	Café	3,4	1,5	4,07	58,41
JAN-A2	SAF1	C51	Café	2,5	1,7	3,93	51,13
JAN-A2	SAF1	C52	Café	2,7	1,6	3,93	50,93
JAN-A2	SAF1	C53	Café	2,24	1,94	4,00	54,48
JAN-A2	SAF1	C54	Café	3,8	1	3,66	38,79
JAN-A2	SAF1	C55	Café	3,2	1,4	3,92	50,52
JAN-A2	SAF1	C56	Café	2,8	2,3	4,43	83,59
JAN-A2	SAF1	C57	Café	3,1	3,4	5,02	151,26
JAN-A2	SAF1	C58	Café	2,6	1,6	3,89	49,14
JAN-A2	SAF1	C59	Café	3	2,7	4,70	109,41
JAN-A2	SAF1	C60	Café	2,7	3,2	4,81	122,83
JAN-A2	SAF1	C61	Café	2,5	2,8	4,57	96,36
JAN-A2	SAF1	C62	Café	2,6	1,4	3,73	41,47
JAN-A2	SAF1	C63	Café	2,2	1,7	3,81	45,28
JAN-A2	SAF1	C64	Café	2,9	2,48	4,55	95,10
JAN-A2	SAF1	C65	Café	2,4	1,5	3,74	41,96
JAN-A2	SAF1	C66	Café	3,1	1,8	4,21	67,45
JAN-A2	SAF1	C67	Café	3,8	3,2	5,14	169,94
JAN-A2	SAF1	C68	Café	2,3	1,62	3,79	44,43
JAN-A2	SAF1	C69	Café	3,2	2,66	4,74	114,14
JAN-A2	SAF1	C70	Café	2,4	1,95	4,07	58,55
JAN-A2	SAF1	C71	Café	2,7	1,6	3,93	50,93
JAN-A2	SAF1	C72	Café	2,9	1,2	3,63	37,83
JAN-A2	SAF1	C73	Café	3	2,7	4,70	109,41
JAN-A2	SAF1	C74	Café	2,7	3,2	4,81	122,83
JAN-A2	SAF1	C75	Café	2,5	2,8	4,57	96,36
JAN-A2	SAF1	C76	Café	2,6	1,4	3,73	41,47
JAN-A2	SAF1	C77	Café	2,2	1,7	3,81	45,28
JAN-A2	SAF1	C78	Café	2,9	3,3	4,92	136,70
JAN-A2	SAF1	C79	Café	3,2	2,9	4,85	127,38
JAN-A2	SAF1	C80	Café	2,6	1,4	3,73	41,47
JAN-A2	SAF1	C81	Café	4,2	2,6	4,97	143,57

ID_Parcela	Sistema	Café_ID	Especie	D15 (cm)	Altura (m)	ln(B)	Biomasa (kg)
JAN-A2	SAF1	C82	Café	3,8	2,9	5,01	149,97
JAN-A2	SAF1	C83	Café	3,4	1,5	4,07	58,41
JAN-A2	SAF1	C84	Café	2,5	1,7	3,93	51,13
JAN-A2	SAF1	C85	Café	2,7	1,6	3,93	50,93
JAN-A2	SAF1	C86	Café	2,24	1,94	4,00	54,48
JAN-A2	SAF1	C87	Café	3,8	1	3,66	38,79
JAN-A2	SAF1	C88	Café	3,2	1,4	3,92	50,52
JAN-A2	SAF1	C89	Café	2,8	2,3	4,43	83,59
JAN-A2	SAF1	C90	Café	3,1	3,4	5,02	151,26
JAN-A2	SAF1	C91	Café	2,6	1,6	3,89	49,14
PGF-A1	SAF2	C1	Café	3,46	1,96	4,42	83,42
PGF-A1	SAF2	C2	Café	4,475	2,6	5,03	152,49
PGF-A1	SAF2	C3	Café	3,685	1,6	4,23	68,44
PGF-A1	SAF2	C4	Café	5,455	1,05	4,06	58,19
PGF-A1	SAF2	C5	Café	5,135	2,3	5,00	148,72
PGF-A1	SAF2	C6	Café	4,43	1,94	4,65	104,13
PGF-A1	SAF2	C7	Café	4,33	1,93	4,62	101,22
PGF-A1	SAF2	C8	Café	2,92	1,55	3,96	52,70
PGF-A1	SAF2	C9	Café	3,415	1,85	4,34	76,56
PGF-A1	SAF2	C10	Café	4,25	2,25	4,79	120,84
PGF-A1	SAF2	C11	Café	3	1,2	3,67	39,07
PGF-A1	SAF2	C12	Café	4,89	1,4	4,33	75,58
PGF-A1	SAF2	C13	Café	5,4	1,72	4,68	107,86
PGF-A1	SAF2	C14	Café	4,415	1,53	4,34	76,77
PGF-A1	SAF2	C15	Café	5,4	1,4	4,42	83,05
PGF-A1	SAF2	C16	Café	2,99	2,6	4,64	103,96
PGF-A1	SAF2	C17	Café	4,515	1,5	4,34	76,48
PGF-A1	SAF2	C18	Café	3,385	1,6	4,15	63,14
PGF-A1	SAF2	C19	Café	5,75	2,57	5,25	190,66
PGF-A1	SAF2	C20	Café	4,48	1,7	4,49	88,99
PGF-A1	SAF2	C21	Café	4,06	1,4	4,15	63,34
PGF-A1	SAF2	C22	Café	3,81	1,3	3,99	54,27
PGF-A1	SAF2	C23	Café	4,31	2,77	5,07	159,47
PGF-A1	SAF2	C24	Café	3,04	1,92	4,27	71,86
PGF-A1	SAF2	C25	Café	3,565	2,25	4,63	102,26
PGF-A1	SAF2	C26	Café	4,045	2,28	4,76	117,25
PGF-A1	SAF2	C27	Café	5,675	1,8	4,79	119,79
PGF-A1	SAF2	C28	Café	3,985	1,5	4,22	67,92
PGF-A1	SAF2	C29	Café	4,56	2,5	5,00	147,69
PGF-A1	SAF2	C30	Café	3,665	1,98	4,49	89,25
PGF-A1	SAF2	C31	Café	2,72	1,59	3,93	50,88
PGF-A1	SAF2	C32	Café	3,225	1,92	4,33	76,01
PGF-A1	SAF2	C33	Café	5,42	1,52	4,53	92,51
PGF-A1	SAF2	C34	Café	3,49	1,77	4,30	73,89

ID_Parcela	Sistema	Café_ID	Especie	D15 (cm)	Altura (m)	ln(B)	Biomasa (kg)
PGF-A1	SAF2	C35	Café	6,16	2,81	5,43	227,99
PGF-A1	SAF2	C36	Café	4,165	1,98	4,61	100,78
PGF-A1	SAF2	C37	Café	5,48	3,1	5,44	231,12
PGF-A1	SAF2	C38	Café	5,325	1,5	4,49	89,45
PGF-A1	SAF2	C39	Café	3,29	1,9	4,34	76,44
PGF-A1	SAF2	C40	Café	4,235	2,5	4,92	137,68
PGF-A1	SAF2	C41	Café	5,39	2,9	5,34	209,03
PGF-A1	SAF2	C42	Café	4,48	3	5,21	183,07
PGF-A1	SAF2	C43	Café	4,525	1,95	4,67	106,94
PGF-A1	SAF2	C44	Café	4,925	1,42	4,35	77,47
PGF-A1	SAF2	C45	Café	3,03	1,5	3,96	52,36
PGF-A1	SAF2	C46	Café	4,84	1,73	4,58	97,92
PGF-A1	SAF2	C47	Café	2,97	2	4,30	74,03
PGF-A1	SAF2	C48	Café	3,595	2,2	4,61	100,17
PGF-A1	SAF2	C49	Café	4,055	2,3	4,78	118,84
PGF-A1	SAF2	C50	Café	3,425	1,75	4,27	71,54
PGF-A1	SAF2	C51	Café	4,655	2,85	5,18	177,89
PGF-A1	SAF2	C52	Café	3,72	1,42	4,08	59,35
PGF-A1	SAF2	C53	Café	3,725	1,75	4,35	77,48
PGF-A1	SAF2	C54	Café	4,805	2,13	4,84	126,65
PGF-A1	SAF2	C55	Café	4,94	1,65	4,54	94,02
PGF-A1	SAF2	C56	Café	4,385	2,36	4,88	132,26
PGF-A1	SAF2	C57	Café	3,09	1,6	4,06	57,90
PGF-A1	SAF2	C58	Café	4,57	1,4	4,26	70,87
PGF-A1	SAF2	C59	Café	4,055	3,1	5,16	173,61
PGF-A1	SAF2	C60	Café	3,765	1,8	4,40	81,12
PGF-A1	SAF2	C61	Café	4,585	1,3	4,17	64,71
PGF-A1	SAF2	C62	Café	5,37	3	5,38	217,46
PGF-A1	SAF2	C63	Café	4,395	2,76	5,09	161,71
PGF-A1	SAF2	C64	Café	2,765	1,8	4,10	60,50
PGF-A1	SAF2	C65	Café	3,865	2,9	5,03	152,41
PGF-A1	SAF2	C66	Café	4,275	1,55	4,33	75,70
PGF-A1	SAF2	C67	Café	3,675	1,3	3,96	52,44
PGF-A1	SAF2	C68	Café	3,795	1,5	4,17	64,84
PGF-A1	SAF2	C69	Café	5,61	1,5	4,54	94,00
PGF-A1	SAF2	C70	Café	3,005	2,75	4,72	112,17
PGF-A1	SAF2	C71	Café	3,775	2,6	4,87	129,73
PGF-A1	SAF2	C72	Café	4,19	3	5,15	171,80
PGF-A1	SAF2	C73	Café	3,97	1,26	3,99	54,24
PGF-A1	SAF2	C74	Café	2,605	2,1	4,24	69,53
PGF-A1	SAF2	C75	Café	3,915	1,5	4,20	66,79
PGF-A1	SAF2	C76	Café	3,085	2,87	4,80	121,41
PGF-A1	SAF2	C77	Café	2,955	3,15	4,88	131,17
PGF-A1	SAF2	C78	Café	4,53	2,7	5,09	161,84

ID_Parcela	Sistema	Café_ID	Especie	D15 (cm)	Altura (m)	ln(B)	Biomasa (kg)
PGF-A1	SAF2	C79	Café	5,96	1,75	4,80	121,09
PGF-A1	SAF2	C80	Café	3,96	1,55	4,25	70,39
PGF-A2	SAF2	C1	Café	2,695	1,75	4,04	56,97
PGF-A2	SAF2	C2	Café	3,255	2,15	4,48	88,53
PGF-A2	SAF2	C3	Café	3,18	1,95	4,34	76,49
PGF-A2	SAF2	C4	Café	4,845	2,42	5,01	150,12
PGF-A2	SAF2	C5	Café	2,645	2,15	4,29	72,69
PGF-A2	SAF2	C6	Café	2,845	1,97	4,24	69,71
PGF-A2	SAF2	C7	Café	2,865	1,86	4,18	65,24
PGF-A2	SAF2	C8	Café	3,01	2,5	4,60	99,54
PGF-A2	SAF2	C9	Café	3,52	2,12	4,54	93,68
PGF-A2	SAF2	C10	Café	2,59	2,5	4,46	86,29
PGF-A2	SAF2	C11	Café	2,76	1,52	3,89	48,73
PGF-A2	SAF2	C12	Café	2,785	1,55	3,92	50,38
PGF-A2	SAF2	C13	Café	3,045	2,55	4,64	103,20
PGF-A2	SAF2	C14	Café	4,71	3,2	5,34	208,39
PGF-A2	SAF2	C15	Café	3,445	2,5	4,73	113,16
PGF-A2	SAF2	C16	Café	2,88	2,18	4,38	80,21
PGF-A2	SAF2	C17	Café	2,635	2,15	4,28	72,43
PGF-A2	SAF2	C18	Café	3,765	2,2	4,65	104,67
PGF-A2	SAF2	C19	Café	3,04	1,56	4,01	55,20
PGF-A2	SAF2	C20	Café	2,895	1,96	4,25	70,42
PGF-A2	SAF2	C21	Café	3,325	2	4,41	82,41
PGF-A2	SAF2	C22	Café	2,875	2	4,27	71,78
PGF-A2	SAF2	C23	Café	2,61	2,5	4,47	86,93
PGF-A2	SAF2	C24	Café	3,945	2,7	4,96	141,92
PGF-A2	SAF2	C25	Café	2,985	2,35	4,51	91,29
PGF-A2	SAF2	C26	Café	4,74	2,45	5,01	149,35
PGF-A2	SAF2	C27	Café	4,23	2,05	4,67	106,88
PGF-A2	SAF2	C28	Café	3,885	2,9	5,03	153,15
PGF-A2	SAF2	C29	Café	5,155	2,26	4,98	145,98
PGF-A2	SAF2	C30	Café	4,88	2,6	5,11	165,57
PGF-A2	SAF2	C31	Café	2,9	2,5	4,57	96,08
PGF-A2	SAF2	C32	Café	2,66	2,4	4,43	84,04
PGF-A2	SAF2	C33	Café	4,61	3,1	5,28	196,11
PGF-A2	SAF2	C34	Café	2,72	2,1	4,28	72,45
PGF-A2	SAF2	C35	Café	2,565	2,06	4,20	66,87
PGF-A2	SAF2	C36	Café	3,08	2,74	4,74	114,30
PGF-A2	SAF2	C37	Café	3,555	2,48	4,75	115,40
PGF-A2	SAF2	C38	Café	3,935	2,68	4,94	140,25
PGF-A2	SAF2	C39	Café	4,32	2,28	4,83	124,81
PGF-A2	SAF2	C40	Café	4,485	1,65	4,45	85,77
PGF-A2	SAF2	C41	Café	3,74	1,7	4,32	74,97
PGF-A2	SAF2	C42	Café	4,775	2,7	5,14	170,15

ID_Parcela	Sistema	Café_ID	Especie	D15 (cm)	Altura (m)	ln(B)	Biomasa (kg)
PGF-A2	SAF2	C43	Café	5,335	2,63	5,21	182,85
PGF-A2	SAF2	C44	Café	3,24	1,68	4,17	64,44
PGF-A2	SAF2	C45	Café	2,565	1,95	4,13	62,36
PGF-A2	SAF2	C46	Café	2,665	1,6	3,92	50,30
PGF-A2	SAF2	C47	Café	4,165	3	5,14	170,82
PGF-A2	SAF2	C48	Café	3,57	2,42	4,72	112,32
PGF-A2	SAF2	C49	Café	4,04	2,55	4,91	135,00
PGF-A2	SAF2	C50	Café	3,695	2,5	4,80	120,94
PGF-A2	SAF2	C51	Café	5,36	2,2	4,99	146,40
PGF-A2	SAF2	C52	Café	3,51	2,55	4,77	118,12
PGF-A2	SAF2	C53	Café	3,85	2,05	4,58	97,74
PGF-A2	SAF2	C54	Café	2,74	2,25	4,38	79,63
PGF-A2	SAF2	C55	Café	3,00	2,02	4,33	75,69
PGF-A2	SAF2	C56	Café	2,92	2,63	4,64	103,14
PGF-A2	SAF2	C57	Café	2,765	2,1	4,30	73,59
PGF-A2	SAF2	C58	Café	3,035	2,15	4,42	82,83
PGF-A2	SAF2	C59	Café	3,545	2,35	4,68	107,49
PGF-A2	SAF2	C60	Café	3,54	2,35	4,68	107,34
PGF-A2	SAF2	C61	Café	3,46	1,75	4,28	72,23
PGF-A2	SAF2	C62	Café	3,435	2,4	4,67	107,14
PGF-A2	SAF2	C63	Café	2,935	2,4	4,52	92,27
PGF-A2	SAF2	C64	Café	2,66	2,4	4,43	84,04
PGF-A2	SAF2	C65	Café	3,255	2,55	4,70	109,95
PGF-A2	SAF2	C66	Café	2,565	2,04	4,19	66,04
PGF-A2	SAF2	C67	Café	4,435	2,73	5,08	160,86
PGF-A2	SAF2	C68	Café	2,745	1,98	4,22	67,82

JAN: Propietario de la parcela Julia Avila Nieves

PGF: Propietario de la parcela Pascual Gerónimo Figueroa

Anexo 4, Datos primarios de submuestreo del componente arbustivo–herbáceo,

Tabla 13, Pesos fresco y seco de submuestras del componente arbustivo–herbáceo por cuadrante,

ID_Parcela	Sistema	ID_Cuadrante	ID_submuestra	PFM_Peso fresco de la muestra colectada (g)	PSM_Peso seco de la muestra colectada (g)	Fracción de materia seca (MS)
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 1	SB_1a	200	48,58	0,24
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 1	SB_1b	200	67,28	0,34
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 1	SB_1c	200	62,25	0,31
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 1	SB_1d	200	45,05	0,23
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 1	SB_1e	200	52,06	0,26
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 2	SB_2a	200	76,33	0,38
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 2	SB_2b	200	77,83	0,39
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 2	SB_2c	200	72,13	0,36
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 2	SB_2d	200	59,07	0,30
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 3	SB_3a	200	78,71	0,39
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 3	SB_3b	200	73,85	0,37
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 3	SB_3c	200	74,03	0,37
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 4	SB_4a	200	88,32	0,44
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 4	SB_4b	200	67,37	0,34
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 4	SB_4c	200	79,05	0,40
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 5	SB_5a	200	95,27	0,48
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 5	SB_5b	200	68,36	0,34
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 5	SB_5c	200	80,2	0,40
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 5	SB_5d	200	81,12	0,41
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 1	SB_1a	200	70,08	0,35
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 1	SB_1b	200	57,81	0,29
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 1	SB_1c	200	66,93	0,33
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 2	SB_2a	200	73,95	0,37
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 2	SB_2b	200	86,78	0,43
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 2	SB_2c	200	61,82	0,31
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 3	SB_3a	200	65,58	0,33
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 3	SB_3b	200	78,29	0,39
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 4	SB_4a	200	76,43	0,38
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 4	SB_4b	200	62,86	0,31
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 5	SB_5a	200	84,33	0,42
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 5	SB_5b	200	78,2	0,39
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 5	SB_5c	200	80,14	0,40
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 1	SB_1a	200	67,88	0,34
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 2	SB_2a	200	63,85	0,32
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 2	SB_2b	200	76,58	0,38

ID_Parcela	Sistema	ID_Cuadrante	ID_submuestra	PFM_Peso fresco de la muestra colectada (g)	PSM_Peso seco de la muestra colectada (g)	Fracción de materia seca (MS)
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 3	SB_3a	200	45,28	0,23
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 3	SB_3b	200	58,99	0,29
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 4	SB_4a	200	70,03	0,35
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 5	SB_5a	200	81,33	0,41
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 5	SB_5b	200	57,2	0,29
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 1	SB_1a	200	38,68	0,19
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 1	SB_1b	200	57,18	0,29
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 2	SB_2a	200	66,53	0,33
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 2	SB_2b	200	67,8	0,34
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 2	SB_2c	200	62,23	0,31
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 3	SB_3a	200	88,81	0,44
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 4	SB_4a	200	84,42	0,42
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 4	SB_4b	200	60,97	0,30
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 5	SB_5a	200	92,47	0,46
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 5	SB_5b	200	64,46	0,32
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 5	SB_5c	200	77,2	0,39

JAN: Propietario de la parcela Julia Avila Nieves

PGF: Propietario de la parcela Pascual Gerónimo Figueroa

Anexo 5, Biomasa arbustiva–herbácea extrapolada por cuadrante,

Tabla 14, Estimación de biomasa arbustiva–herbácea por cuadrante y parcela ($t\ ha^{-1}$),

ID_Parcela	Sistema	ID_Cuadrante	Promedio fracción de materia seca del cuadrante(g)	PFT_Peso total por metro cuadrado (g)	biomasa arbustiva/herbácea ($t\ ha^{-1}$)
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 1	0,28	1075	2,96
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 2	0,36	887	3,16
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 3	0,38	710	2,68
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 4	0,39	635	2,48
JAN-A1	SAF1	Cuadrante 5	0,41	886	3,60
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 1	0,32	675	2,19
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 2	0,37	687	2,55
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 3	0,36	510	1,83
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 4	0,35	435	1,51
JAN-A2	SAF1	Cuadrante 5	0,40	686	2,77
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 1	0,34	275	0,93
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 2	0,35	487	1,71
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 3	0,26	510	1,33
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 4	0,35	235	0,82
PGF-A1	SAF2	Cuadrante 5	0,35	486	1,68
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 1	0,24	475	1,14
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 2	0,33	687	2,25
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 3	0,44	310	1,38
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 4	0,36	435	1,58
PGF-A2	SAF2	Cuadrante 5	0,39	686	2,68

JAN: Propietario de la parcela Julia Avila Nieves

PGF: Propietario de la parcela Pascual Gerónimo Figueroa