

Informe de Investigación | Septiembre 2025

OPORTUNIDADES MÁS ALLÁ DEL GRANO

Hacia un Modelo Circular en la Cadena de Valor del Cacao



OPORTUNIDADES MÁS ALLÁ DEL GRANO

Hacia un Modelo Circular en la Cadena de Valor del Cacao



AUTORAS:

Prof. Dr. María Franco

Profesora titular de Economía Circular
Departamento de Ingeniería y Tecnología de la Información
Universidad de Ciencias Aplicadas de Berna
Biel, Suiza
maria.francomosquera@bfh.ch

Dr. Michelle Viera

Profesora Titular de Negocios Internacionales
Facultad de Ciencias Administrativas
Universidad de Guayaquil
Guayaquil, Ecuador
michelle.vierarom@ug.edu.ec

M. Sc. Fanny Jaramillo

Profesora Titular de Negocios Internacionales
Facultad de Ciencias Administrativas
Universidad de Guayaquil
Guayaquil, Ecuador
fanny.jaramillov@ug.edu.ec

Contenido

1.	Una bioeconomía circular para el cacao	11
	1.1 Un balance global de la biomasa generada	12
2.	Acerca del cacao	13
	2.1 Sobre las variedades de cacao	13
3.	La cadena de valor del cacao	15
	3.1 Cultivo y cosecha	15
	3.2 Fermentación	16
	3.3 Secado	16
	3.4 Empaque y transporte	17
	3.5 Tostado	17
	3.6 Conchado	17
	3.7 Templado	18
4.	Retos actuales en la industria del cacao	19
	4.1 Desafíos socioeconómicos	19
	4.2 Retos ambientales	20
5.	Aprovechamiento de los residuos biológicos del cacao dentro de la cadena de valor	22
	5.1 Mazorcas de cacao	22
	5.2 Pulpa o mucílago	26
	5.3 Jugo o miel de cacao	28
	5.4 Cascarillas	29
6.	Un estudio de caso sobre la cadena de valor agroindustrial del cacao ecuatoriano-suizo	30
	6.1 La industria del cacao ecuatoriano	30
	6.2 La industria chocolatera suiza	31
	6.3 Metodología	32
	6.4 Resultados	36
7.	Conclusiones y recomendaciones	48
	7.1 Conclusiones	48
	7.2 Recomendaciones	49
8.	Referencias	51

Figuras

Figura 1 Fuentes de impacto ambiental a lo largo de la cadena de valor del cacao	21
Figura 2 Residuos biológicos y no biológicos que se generan en la cadena de valor del cacao	23
Figura 3 Límites del sistema ACV	35
Figura 4 Distribución de los agricultores encuestados (mapa)	36
Figura 5 Distribución de los agricultores encuestados por provincia (histograma)	36
Figura 6 Variedades de cacao cultivadas por tamaño de finca	37
Figura 7 Otros cultivos por tamaño de la explotación agrícola	37
Figura 8 Rendimiento anual por variedad de cacao y tamaño de la finca.	38
Figura 9 Etapas de la cadena de valor del cacao controladas por pequeños agricultores	39
Figura 10 Eliminación de las mazorcas de cacao	40
Figura 11 Eliminación de pulpa/mucílago de cacao	40
Figura 12 Desafíos de valorización percibidos por tamaño de finca	44
Figura 13 Atractivo percibido de diferentes alternativas de valorización según el tamaño de la explotación	45
Figura 14 Resultados normalizados en diferentes categorías de impacto ambiental para los sistemas de productos analizados	46

Tablas

Tabla 1 Biomasa estimada del fruto del cacao	12
Tabla 2 Variedades de cacao	14
Tabla 3 Métodos de fermentación del cacao	16
Tabla 4 Sistemas de producción de biocarbón	25
Tabla 5 Lista de entrevistados	34
Tabla 6 Principales diferencias entre la pulpa del cacao CCN-51 y Nacional	41

Lista de abreviaturas

AAB	Bacterias del ácido acético
ACV	Análisis de ciclo de vida
C	Carbono
Ca	Calcio
Cd	Cadmio
EC	Economía circular
CH₄	Metano
GEI	Gases de efecto invernadero
K	Potasio
ICCO	Organización Internacional del Cacao
BAL	Bacterias del ácido láctico
ACL	Evaluación del ciclo de vida
N	Nitrógeno
N₂O	Oxido Nitroso
P	Fósforo
Pb	Plomo
SCOBY	Cultivo simbiótico de bacterias y levaduras
MOS	Materia orgánica del suelo

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todos quienes contribuyeron al exitoso desarrollo de esta investigación: los productores de cacao encuestados, los técnicos de campo y las empresas que componen la cadena de valor del cacao tanto en Suiza como en Ecuador. Un agradecimiento especial a Pablo Noboa, Nadia Rosales, Christian Aguayo y Oliver Lichtfus, de la Fundación Producer Plus en Ecuador, cuyo apoyo fue fundamental, especialmente durante la etapa de recopilación de datos en el campo.

Nuestro sincero agradecimiento también a Juan Blasco, graduado del programa de Ingeniería Industrial en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) que realizó un intercambio académico en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Berna, así como a Melanie Boillat, graduada del programa de Ingeniería Industrial y Gestión (WING) en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Berna, por su apoyo en la investigación a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Resumen Ejecutivo

La bioeconomía circular integra los principios de la economía circular y la bioeconomía, centrándose en la utilización sostenible de los recursos biológicos, incluidos los residuos agrícolas y forestales, así como en la elaboración de productos con valor agregado, mientras fomenta la biodiversidad y preserva los ecosistemas.

En la industria del cacao, la transición hacia una bioeconomía circular es imprescindible debido a la gran cantidad de residuos biológicos que se generan durante el procesamiento de la fruta. La producción de cacao genera diversos subproductos, entre ellos mazorcas, pulpa, jugos y cascarillas, que a menudo se desechan, lo que no solo provoca la degradación del medio ambiente, sino también ineficiencia económica y pérdida de oportunidades. En las páginas siguientes, se plantea que aprovechar el potencial de estos subproductos mediante procesos circulares e innovadores puede cambiar drásticamente la dinámica de la producción de cacao y los medios de vida que dependen de ella.

Además de ofrecer una visión general de la cadena de valor del cacao (Sección 3) y los desafíos ambientales y socioeconómicos a los que se enfrenta actualmente (Sección 4), este informe aporta evidencias respaldadas en investigaciones sobre las oportunidades de valorización que tiene el cacao (Sección 5). En definitiva, la bioeconomía circular integra los residuos del cacao a un portafolio de recursos renovables. Las mazorcas pueden convertirse en suplementos con una huella de carbono negativa y que son útiles para mejorar el suelo o pueden convertirse también en productos químicos de origen biológico. La pulpa y sus jugos proporcionan azúcares, ácidos y compuestos bioactivos que sirven de base para bebidas novedosas y alimentos funcionales. Las

cascarillas de los granos ofrecen fibra, antioxidantes y lignina para la fabricación de papel o la elaboración de cosméticos. En conjunto, aplicaciones como estas prometen (1) reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al evitar la descomposición de material vegetal al aire libre, (2) diversificar los ingresos de los agricultores y (3) crear nuevos nichos industriales basados en materias primas vegetales de bajo coste.

Además, presentamos un estudio de caso que analiza las prácticas actuales de gestión de residuos en el marco de una bioeconomía circular para Ecuador y Suiza (Sección 6). Ecuador, tercer exportador mundial de cacao, es famoso por su cacao de alta calidad, Cacao de Fino de Aroma. Suiza, sede de una industria chocolatera reconocida a nivel mundial, es un socio comercial clave, ya que importa cacao ecuatoriano para la producción de chocolate de primera calidad. Para evaluar de manera exhaustiva las oportunidades y los desafíos de la creación de valor circular en la cadena de valor del cacao entre Ecuador y Suiza, se empleó un enfoque integrador de métodos mixtos (sección 6.3).

En primer lugar, se realizó una encuesta estructurada a 1.034 productores de cacao de las principales regiones productoras de Ecuador. El objetivo de la encuesta fue mapear cuantitativamente las prácticas actuales en la gestión de los subproductos del cacao, recopilar datos demográficos y características de las fincas agrícolas, e identificar sistemáticamente los obstáculos para la adopción de estrategias circulares y de valorización. La encuesta proporcionó una visión estadísticamente sólida de la realidad cotidiana a la que se enfrentan los pequeños productores, incluidas las barreras relacionadas con el conocimiento, el acceso al mercado, la financiación y la tecnología.

En segundo lugar, se realizaron entrevistas semiestructuradas a 23 representantes de distintos segmentos de la cadena de valor del cacao tanto en Ecuador como en Suiza, entre ellos productores,

procesadores, exportadores, representantes de ONG y expertos del sector (Tabla 5). Estas entrevistas exploraron de forma cualitativa las experiencias, motivaciones y percepciones de las partes interesadas en torno al manejo de los residuos biológicos del cacao y las posibles alternativas de valorización. Las entrevistas ofrecieron una visión matizada y profunda de los retos y oportunidades a nivel institucional, técnico y de mercado desde la perspectiva de quienes participan directamente en el sector del cacao o influyen en él.

Por último, se llevó a cabo un análisis del ciclo de vida (ACV), en el que se compararon tres escenarios distintos para la gestión de los subproductos del cacao: (i) la descomposición en campo abierto de las mazorcas de cacao, (ii) la conversión de las mazorcas en biocarbón para uso agrícola, (iii) la sustitución del azúcar convencional por pulpa de cacao deshidratada bajo el método spray dried en la fabricación de chocolate. El objetivo del ACV fue evaluar sistemáticamente los impactos ambientales de cada tipo de manejo de los residuos biológicos desde su origen hasta su salida de la fábrica. Se cuantificaron factores como las emisiones de gases de efecto invernadero, la captura de carbono, el uso del suelo y el ciclo de los nutrientes para cada escenario, lo que permitió formular recomendaciones basadas en evidencias para maximizar tanto la sostenibilidad como el valor económico en la cadena de valor del cacao.

Esta exhaustiva investigación sobre la cadena de valor del cacao entre Ecuador y Suiza reveló una marcada desconexión entre el considerable potencial de las aplicaciones de la bioeconomía circular y las prácticas actuales entre los agricultores (Sección 6.4). La encuesta realizada a 1.034 productores de cacao ecuatorianos demostró que, por ejemplo, solo el 1,2% de los productores declararon transformar las mazorcas de cacao en biocarbón, y solo el 0,4% utilizaban la pulpa del cacao para productos con valor agregado. Esto representa un enorme recurso sin explotar para la valorización sostenible. La investigación también identificó tres barreras principales que impiden su adopción generalizada: la falta de conocimiento sobre las oportunidades de valorización (que afecta al 72,4% de las pequeñas fincas agrícolas), el acceso restringido a financiamiento y equipos (57.1% de las pequeñas

fincas agrícolas) y una limitada comprensión sobre la demanda del mercado de subproductos del cacao (58,2% de las pequeñas fincas agrícolas). Estos resultados ponen de manifiesto que son limitaciones estructurales, más que la falta de interés, las que impiden a los agricultores aprovechar las oportunidades de la economía circular.

La evaluación del impacto ambiental y económico reveló que la producción de biocarbón a partir de las mazorcas de cacao ofrece los beneficios más significativos en materia de sostenibilidad, ya que permite reducir en un 33,25% el impacto del calentamiento global mediante la captura de carbono, al tiempo que mejora potencialmente la salud del suelo y el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, los elevados costos de inversiones iniciales y la complejidad técnica de los sistemas de producción de biocarbón los hacen en gran medida inaccesibles para los pequeños agricultores, que constituyen el 76% de la población encuestada. Las entrevistas con los representantes de las distintas instancias de la cadena de valor también confirmaron que, si bien están surgiendo aplicaciones nicho para la pulpa de cacao en bebidas, postres y productos especiales, las barreras normativas —en particular el Reglamento sobre nuevos alimentos de la UE—, el conocimiento del mercado y las dificultades en la estandarización de la calidad limitan la escalabilidad comercial.

Se concluye que el desarrollo de nuevas aplicaciones para los residuos biológicos del cacao depende de un plan de acción coordinado y transdisciplinario que incluya implementar tecnologías innovadoras a pequeña escala, agilizar las aprobaciones reglamentarias, integrar la trazabilidad en las declaraciones sobre el carbono y los ingredientes, y diseñar modelos justos de reparto de ingresos que aumenten la participación de los agricultores en el valor más allá del límite actual del 7%. Cuando las mazorcas, la pulpa, los jugos y las cascarillas encuentren salidas productivas, la industria del cacao pasará de ser un exportador exclusivo de granos a una bioeconomía diversificada y positiva para el clima, anclada en los países productores. En la última sección de este informe (sección 7) se ofrecen otras recomendaciones para acciones futuras.

El cacao es mucho más que un grano para hacer chocolate, es el sustento de millones de pequeños agricultores y de economías nacionales enteras. Sin embargo, dado que el sector genera millones de toneladas de residuos biológicos al año, las normas de producción tradicionales han dejado sin explotar en gran medida el potencial ambiental y económico. Al considerar el cacao no solo como un producto agrícola, sino como una fuente de valor circular, imaginamos un futuro en el que cada subproducto sea un recurso, no una carga. Se espera que el presente informe sirva de plataforma para visibilizar las aplicaciones actuales de la bioeconomía circular en la industria del cacao, destacando su papel en la mejora de la gestión industrial y el fortalecimiento de las asociaciones orientadas a la innovación, frente a los desafíos sociales, económicos y ambientales que se plantean a nivel mundial.



Prof. Dr. María Franco
Bern University of Applied Sciences

Dr. Michelle Viera
Universidad de Guayaquil

M. Sc. Fanny Jaramillo
Universidad de Guayaquil

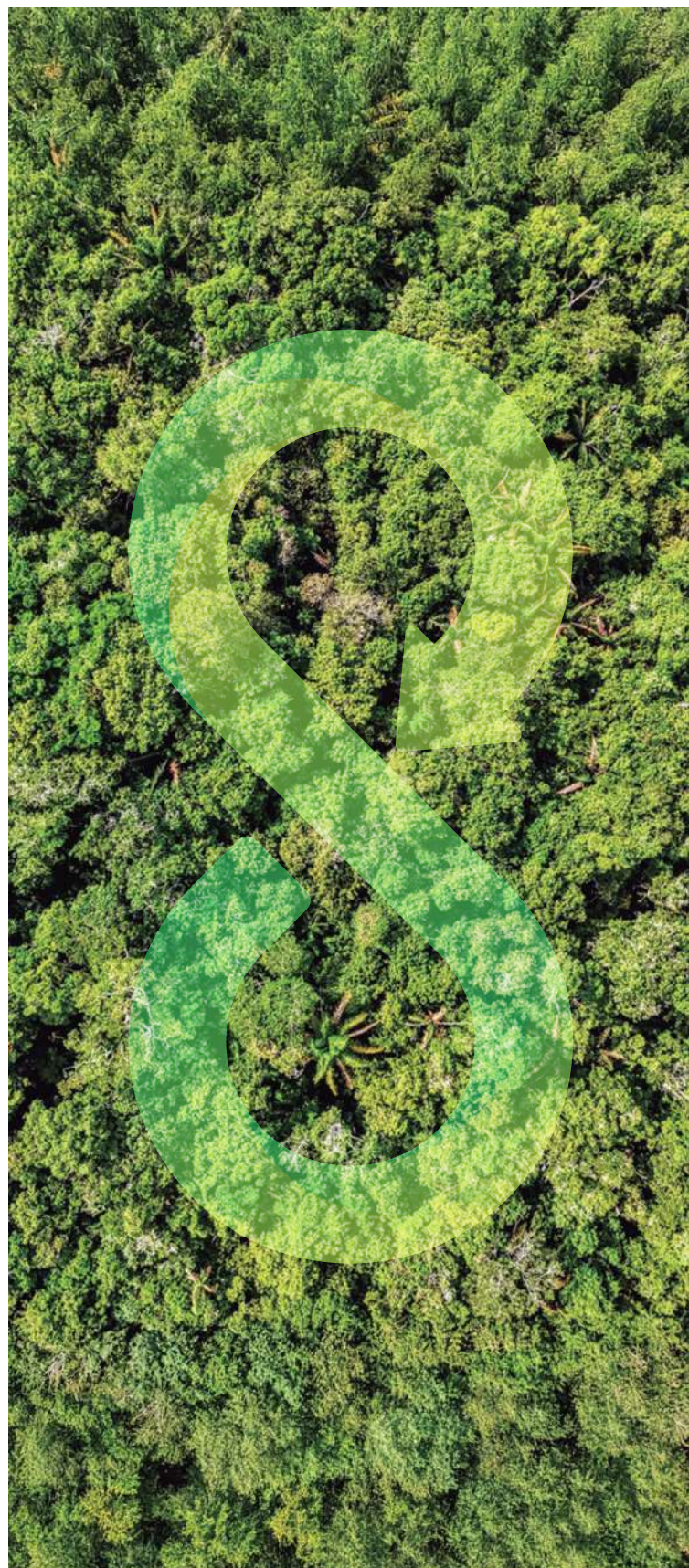
1. Una bioeconomía circular para el cacao

La bioeconomía circular es un marco transformador que integra los conceptos de economía circular (EC) y bioeconomía, enfatizando la eficiencia en el uso de recursos, la valorización de subproductos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [1].

Aplicado al cacao, cuya producción mundial de granos alcanzó cerca de 5 millones de toneladas en la temporada 2022/23, este modelo resulta particularmente atractivo. Se estima que aproximadamente el 80% de cada mazorca de cacao se convierte en biomasa residual (es decir, mazorcas, pulpa y cascarillas) durante el procesamiento primario, generando millones de toneladas de subproductos cada año.

Los beneficios de la bioeconomía circular para la industria del cacao son múltiples. En primer lugar, se observa una mejora en la eficiencia de los recursos, mediante la utilización de todas las partes del árbol de cacao y la integración de los residuos en procesos productivos. En segundo lugar, se identifican potenciales ventajas económicas, que incluyen ahorros en costos por la reducción de la eliminación de residuos y nuevas fuentes de ingresos procedentes de los subproductos, que a menudo se dejan descomponer en el campo o se queman, contribuyendo a dañar el suelo y a las emisiones de gases de efecto invernadero. [2]. Como se explica más adelante en este informe, los subproductos del cacao contienen compuestos valiosos, que incluyen ingredientes biológicamente activos, antioxidantes, nutrientes y minerales, que pueden ser aprovechados en diversas industrias para aplicaciones de alto valor.

La valorización de los residuos biológicos del cacao podría traducirse directamente en mayores oportunidades de ingresos para los pequeños agricultores, quienes actualmente dependen principalmente de la venta de granos para obtener ingresos.



Además, mediante la utilización eficiente de los subproductos, es posible reducir significativamente la huella de carbono asociada con la industria del cacao, contribuyendo a los esfuerzos globales para combatir el cambio

climático. Finalmente, promover una economía circular en la producción de cacao favorece de manera efectiva la colaboración entre los diferentes actores involucrados.

1.1 Un balance global de la biomasa generada

Según los últimos datos de la Organización Internacional del Cacao (ICCO), la previsión revisada para la producción mundial de cacao en la temporada 2024/25 es de 4,84 millones de toneladas de cacao seco en grano.

La tabla 1 muestra la biomasa potencial calculada para diferentes partes del fruto del cacao. Según las aproximaciones que figuran a continuación, la biomasa total estimada generada en el

procesamiento del cacao para la elaboración de chocolate en toda la cadena de valor es de aproximadamente 4 a 5 millones de toneladas. Es importante señalar que este cálculo proporciona una estimación basada en los datos disponibles y en algunas hipótesis. La biomasa real generada puede variar en función de factores como los métodos de procesamiento, la eficiencia y las diferencias regionales en las prácticas de producción y las variedades de cacao.

Tabla 1 Biomasa estimada del fruto del cacao

Tipo de Subproducto	Descripción	Cálculo	Total (en toneladas)
Mazorca de cacao	Representa un promedio del 70-80% del peso seco del fruto del cacao	Estimación mínima: $4'840.000 \times 0,70$ Estimación máxima: $4'840.000 \times 0,80$	3'388,000 - 3,872,000
Pulpa o mucílago de cacao	El porcentaje estimado de pulpa suele ser del 5% al 10% del peso del fruto	Estimación mínima: $4'840.000 \times 0,05$ Estimación máxima: $4'840.000 \times 0,10$	242,000 – 484,000
Cascarillas del grano de cacao	Se estima que la cascarilla del grano de cacao representa entre el 10% y el 17% de la masa seca del grano de cacao después del procesamiento (se separa durante el tostado y descascarillado)	Estimación mínima: $4'840.000 \times 0,10$ Estimación máxima: $4'840.000 \times 0,17$	484,000 – 822,000
Total			Estimación mínima: 4'114.000 Estimación máxima: 5'178.000

2. Acerca del cacao

El cacao (*Theobroma cacao*) es un fruto tipo baya que crece en el tronco y en las ramas más antiguas de sus árboles. El cacao crece en la franja ecuatorial, entre aproximadamente 20 grados al norte y al sur de la línea del Ecuador, incluyendo regiones de África Occidental, Centro y Sudamérica, y el Sudeste Asiático [3].

Hoy en día, la industria mundial del cacao está dominada por Costa de Marfil y Ghana como principales productores y exportadores, que juntos representan alrededor de dos tercios del suministro mundial de cacao. Otros productores importantes son Ecuador, Indonesia y Nigeria. La industria se sustenta en gran medida por pequeños agricultores, con aproximadamente 5 millones de cacaoteros, la mayoría de los cuales operan en pequeñas parcelas de 2 a 5 hectáreas y que son responsables de cerca del 95% de la producción mundial de cacao [4].

2.1 Sobre las variedades de cacao

El cacao puede clasificarse en dos tipos principales: al granel (ordinario) y el de fino aroma. La categoría al granel incluye variedades como Forastero y CCN-51, que dominan la producción mundial. El Forastero, cultivado principalmente en África Occidental, representa el 80-90% del suministro mundial de cacao. Aunque es fuerte y resistente a las enfermedades, carece de los sabores complejos de las variedades más finas. [5]. En cambio, las variedades de cacao de fino aroma son célebres por sus perfiles de sabor únicos.

La variedad Criollo, originaria de los bosques tropicales de México y Centroamérica, es muy apreciada por su sabor dulce, pero sólo representa alrededor del 10% de la producción mundial. Otra variedad fina, el Trinitario, es un híbrido que combina las cualidades aromáticas del Criollo con la resistencia del Forastero.



La tabla 2 presenta una comparación de las tres principales variedades de cacao, Forastero, Criollo y Trinitario, destacando sus características físicas,

perfiles de sabor, productividad, resistencia a enfermedades y uso típico en el mercado.

Tabla 2 Variedades de cacao

Características	Forastero	Criollo	Trinitario
Color de la mazorca	Amarillo a naranja	Rojo, amarillo, o naranja	Verde, amarillo, o rojo
Forma de la mazorca	Similar al melón, suave	Alargado, rugoso	Alargado, ligeramente rugoso
Grosor de la mazorca	Gruoso (2-3 cm)	Delgado y frágil	Varía (híbrido)
Color del grano	Café oscuro a violeta	Blanco marfil a morado pálido	Morado
Perfil de sabor	Amargo, menos aromático	Delicado, floral, frutal	Balanceado, frutal, floral
Productividad	Alta	Baja	Moderada
Resistencia a enfermedades	Alta	Baja	Moderada
Participación en la producción mundial	80-90%	3-5%	10-15%
Origen genético	Cuenca del Amazonas	Originario de América Central	Híbrido de Criollo y Forastero
Percepción de la calidad	Estándar	Superior	Fino
Principales regiones productoras	África Occidental, Sudeste Asiático	América Central, Caribe	Caribe, América Central y América del Sur
Características	Robusto, resistente a enfermedades	Delicado, propenso a enfermedades	Intermedio
Uso en el mercado	Chocolate para el mercado masivo	Chocolate fino y artesanal	Chocolate superior



3. La cadena de valor del cacao

El cultivo y procesamiento del cacao implican una serie de pasos complejos que transforman los granos de cacao crudos en chocolate de alta calidad. Comprender la cadena de valor del cacao es esencial antes de explorar su valorización, ya que proporciona el contexto necesario para identificar los puntos en los que, la manera en que y los actores en los cuales se pueden desarrollar e implementar de manera más eficaz las oportunidades de valorización.

La siguiente sección describe las etapas clave del cultivo y procesamiento del cacao, desde las prácticas previas a la cosecha hasta el manejo posterior a la cosecha.

3.1 Cultivo y cosecha

Después de limpiar y labrar la tierra, se procede a la siembra de las semillas de cacao y estas se espacian adecuadamente para optimizar el crecimiento y el rendimiento. Durante esta fase de establecimiento es fundamental realizar un mantenimiento regular del suelo, que incluye el uso de acolchado, sombreado, deshierbe y control de plagas. Una vez plantados los árboles de cacao, las mazorcas suelen tardar entre 5 y 6 meses en madurar. Sin embargo, el período de maduración depende de la variedad de cacao y de las condiciones climáticas del lugar donde se cultiva [6]. Una vez que el fruto está maduro, comienza el proceso de cosecha. Los agricultores inician la recolección identificando las mazorcas maduras, que se reconocen por los cambios de color, que suele pasar de verde a amarillo, naranja o rojo, según la variedad, y a veces golpeando las mazorcas para escuchar si suenan huecas, lo que indica que las semillas se han soltado en su interior.



La cosecha se realiza totalmente a mano, a veces utilizando pértigas para alcanzar los árboles más altos. Una vez recolectadas, las mazorcas se apilan en una zona específica de la finca. Mediante una inspección visual, las mazorcas demasiado

maduras o enfermas se separan de la pila principal en esta fase. Por último, las mazorcas de cacao sanas se abren con cuchillos o machetes para extraer los granos húmedos[7].

Tabla 3 Métodos de fermentación del cacao

Método	Duración	Giro necesario	Escala	Equipo necesario
Fermentación por apilamiento	2-6 días	No	Pequeña escala	Hojas de plátano o láminas de plástico
Fermentación en cajas	2-6 días	Sí (a las 24 y a las 72 horas)	Gran escala	Cajas de madera
Fermentación en plataformas	4 días	No	Pequeña escala	Plataformas
Fermentación en sacos	2-6 días	Opcional	Pequeña a mediana escala	Bolsas de yute o plástico

3.2 Fermentación

La fermentación del grano de cacao comienza inmediatamente después de la cosecha, cuando los granos se extraen de las mazorcas y se colocan junto con su pulpa mucilaginosa en pilas o recipientes de fermentación. El proceso de fermentación comienza con la acción de agentes microbianos naturales que colonizan la pulpa del cacao, particularmente: (i) levaduras, que descomponen los azúcares de la pulpa y producen etanol y dióxido de carbono, (ii) bacterias del ácido láctico (BAL), que estabilizan el entorno de fermentación al reducir el pH, y (iii) bacterias del ácido acético (BAA), que convierten el etanol en ácido acético, lo que eleva la temperatura y la acidez de los granos [8]. La actividad microbiana descrita inicia una serie de cambios bioquímicos fundamentales para la generación de precursores de sabor y aroma que darán lugar a las características sensoriales finales del chocolate. El cambio de color durante la fermentación del cacao actúa como indicador de que se están produciendo procesos bioquímicos en el interior de los granos, lo cual es necesario para las siguientes fases de secado y tostado.

Los métodos de fermentación pueden adoptar muchas formas, entre ellas: (i) apilamiento (es decir, los granos se colocan en una superficie plana y se cubren con hojas de plátano, por ejemplo, para retener el calor y la humedad), (ii) cajas de madera (con orificios de drenaje), (iii) plataformas o cubetas, (iv) fermentación en sacos de yute (que permiten la aireación parcial y el drenaje del líquido

que se desprende). El método de fermentación empleado depende de la variedad de cacao y de las prácticas regionales del país de origen [9]. El proceso de fermentación suele durar entre 4 y 6 días para la mayoría de las variedades comerciales, como Forastero y Trinitario, mientras que los granos Criollo pueden requerir entre 2 y 3 días.

3.3 Secado

El proceso de secado tiene como objetivo reducir el contenido de agua o humedad de los granos (de aproximadamente el 60% al 8-5%), para garantizar que puedan almacenarse de forma segura durante períodos y enviarse posteriormente para exportación [10]. La elección del método de secado depende en gran medida de diversos factores, entre ellos las condiciones climáticas locales, el genotipo del cacao y la situación económica de cada agricultor. Las técnicas de secado más utilizadas son: secado al sol, secado eléctrico (horno y microondas) y liofilización [11].

El secado al sol es el método más extendido en las zonas tropicales, donde la radiación solar es abundante durante la temporada de cosecha. Se lleva a cabo extendiendo los granos de cacao sobre esteras de madera elevadas y láminas de plástico o sobre suelos de hormigón durante las horas de sol. En este método, los granos se remueven o se voltean tres veces al día y se dejan secar durante unos cinco días. A pesar de ser respetuoso con el medio ambiente y también

rentable, debido a los bajos costos de construcción y funcionamiento[11], este método presenta algunas desventajas. En primer lugar, requiere mucha mano de obra, ya que los granos deben voltearse manualmente con regularidad y guardarse en caso de lluvia. En segundo lugar, depende de las condiciones meteorológicas, por lo que no es viable durante los periodos de lluvias intensas y alta humedad, y suele tardar más tiempo en secarse (entre 7 y 22 días). Por último, durante el secado al aire libre puede ocurrir contaminación cuando insectos o animales domésticos entran en contacto con los granos de cacao[12], lo que da lugar a productos de baja calidad y a una pérdida de ingresos para los agricultores [13].

Otros métodos comunes son el secado en horno y el secado en microondas. Ambos sistemas utilizan aire caliente para secar los granos de cacao por medios artificiales. Por ejemplo, el secado en horno se utiliza en regiones con estaciones lluviosas, ya que ofrece una ventaja significativa en cuanto al tiempo, acortando el período de secado necesario para que los granos alcancen un contenido de humedad adecuado para su almacenamiento seguro (normalmente entre 12 y 24 horas) [12]. Este método requiere un control cuidadoso de la temperatura para evitar que el calor excesivo provoque amargor en los granos.

3.4 Empaque y transporte

Una vez secos, los granos de cacao se limpian para eliminar defectos antes de que estén listos para ser empacados. El control de calidad en esta etapa es esencial mediante inspecciones de tamaño, color y nivel de humedad (idealmente entre el 7 y el 8%). Después de la limpieza y clasificación, los granos de cacao se empacan cuidadosamente en sacos de yute con un peso típico entre 60 y 65 kg. Los sacos de yute son el estándar en la industria debido a su durabilidad, transpirabilidad y beneficios ambientales. Finalmente, para mejorar la protección contra factores ambientales, las empresas exportadoras suelen utilizar revestimientos especializados dentro de los sacos tradicionales de yute.

Por lo general, los granos de cacao se transportan en camiones desde la finca hasta el puerto, y luego por mar a diferentes destinos, especialmente a los países productores de chocolate ubicados en Europa y Estados Unidos [14]. Normalmente, se siguen las normas sanitarias y fitosanitarias para

garantizar un transporte eficiente de los granos de cacao [15]. Al llegar a los puertos de destino, los granos se inspeccionan para garantizar que estén en buenas condiciones, sin daños y sin signos de infestación de plagas [16].

3.5 Tostado

El tostado de los granos de cacao es una etapa fundamental en la producción del chocolate, ya que favorece la formación de compuestos aromáticos y saborizantes característicos mediante un control preciso de la temperatura (normalmente entre 110 y 160 °C) y el tiempo (entre 15 minutos y 2 horas). [17]. Este proceso emplea la transferencia de calor por convección (circulación de aire caliente) o por conducción (contacto directo con superficies calientes) en tostadores especializados u hornos industriales [18]. Más allá del desarrollo del sabor, el tostado desempeña funciones fundamentales en la seguridad microbiana y la transformación fisicoquímica [19].

Para separar los granos de cacao de sus cascarillas, los granos tostados se separan mediante gravedad y flujo de aire. Los granos liberados se muelen hasta obtener licor de cacao utilizando rodillos de piedra o molinos industriales, y el calor generado por la fricción licúa la manteca de cacao (punto de fusión ~34°C). Aunque los mercados especializados venden ocasionalmente granos tostados para uso culinario, la mayoría se destina a la producción industrial de chocolate. El tostado industrial se realiza por lotes (en operaciones de menor escala con mayor control) o de forma continua (mediante sistemas automatizados de transporte). La temperatura y la duración se adaptan al origen del grano y a los perfiles de sabor deseados.

3.6 Conchado

La función principal del conchado es mejorar el sabor y transformar una mezcla heterogénea de partículas, como azúcar, sólidos lácteos, sólidos de cacao y manteca de cacao (una mezcla de triglicéridos), en una masa de chocolate uniforme y fluida. En este proceso, una máquina que funciona como mezcladora y agitadora (una concha) distribuye la manteca de cacao. La fricción generada durante el conchado induce cambios químicos y físicos, que son cruciales para desarrollar la textura suave y el sabor refinado del chocolate.

El conchado consta de tres etapas: seca, pasta y líquida, donde los nibs de cacao se trituran durante las fases seca y de pasta, y finalmente se convierten en líquido. Las condiciones específicas del proceso de conchado, incluyendo el tiempo, temperatura y genotipo del cacao, influyen significativamente en los niveles de polifenoles y metilxantinas en el chocolate terminado. Estos compuestos no volátiles son en gran medida responsables de la astringencia y el amargor característicos del chocolate negro, ambos importantes para su perfil de sabor [20]. El conchado suele tomar entre 16 y 24 horas, aunque la duración puede variar. La temperatura utilizada depende del tipo de chocolate que se produzca: usualmente es superior a 40 °C, pero para el chocolate negro son comunes temperaturas entre 70 y 82 °C [21].

3.7 Templado

Una vez que el conchado está completo, el chocolate debe ser atemperado o templado. El templado consiste en enfriar y recalentar cuidadosamente el chocolate para estabilizar los cristales de manteca de cacao, lo que le da al chocolate terminado su aspecto brillante, su textura firme y deseable [22]. Cuando un chocolate está en buen estado, se caracteriza por la presencia óptima de pequeños cristales en la estructura cristalina correcta, distribuidos uniformemente por toda la masa de chocolate; por el contrario, cuando no se producen suficientes cristales, puede causar problemas de manipulación para el fabricante y generar anomalías en la calidad [23].



4. Retos actuales en la industria del cacao

A pesar de su importancia económica, el sector del cacao se encuentra ante desafíos. La situación actual está marcada por la fluctuación de los precios del mercado, problemas estructurales como el envejecimiento de las plantaciones, la vulnerabilidad al cambio climático, y la preocupación constante por los medios de vida de los agricultores y la sostenibilidad.

En los últimos años, las malas condiciones climáticas y las enfermedades de las plantas han provocado escasez del producto y precios récord. El sector también se ve sometido a una presión cada vez mayor para adoptar prácticas más sostenibles y éticas en respuesta a la demanda de transparencia y comercio justo por parte de los consumidores. En las siguientes secciones se analizan los retos a los que se enfrenta la industria del cacao.

4.1 Desafíos socioeconómicos

4.1.1 Condiciones de pobreza

El cultivo del cacao suele estar asociado a condiciones significativas de pobreza. Los bajos ingresos son especialmente frecuentes entre los pequeños agricultores, cuyas fincas suelen caracterizarse por su reducida superficie y su baja productividad. La falta de ingresos adecuados limita severamente la capacidad de estos agricultores para invertir en sus fincas y mejorar sus medios de vida, lo que los mantiene atrapados en una espiral de baja productividad y bajos ingresos. En Costa de Marfil y Ghana, por ejemplo, los dos mayores productores mundiales de cacao, hasta un 58% de los agricultores de cacao viven por debajo de la línea de pobreza extrema del Banco Mundial, que es de \$2,15 dólares al día [33].

La fluctuación de los precios del cacao agrava aún más la vulnerabilidad económica de los agricultores. Esta volatilidad en los precios puede



dar lugar a flujos de ingresos impredecibles, lo que dificulta a los agricultores la planificación financiera. El acceso a los recursos y servicios es otro reto fundamental. Muchos productores de cacao carecen de acceso al crédito, lo que limita su capacidad para adquirir los insumos necesarios e invertir en tecnologías que mejoren la productividad. Además de factores como la disponibilidad de tierras, el acceso a servicios financieros y la fluctuación de los precios del mercado, los agricultores también ven cómo sus ingresos disminuyen con el tiempo. Al considerar la vida económica de un árbol de cacao, que suele ser de entre 30 y 40 años, los estudios muestran que los rendimientos comienzan a disminuir después de unos 15 años [34]. Como resultado de esta situación, muchos agricultores se ven obligados a diversificar sus fuentes de ingresos y dedicarse a otras actividades económicas, lo que a menudo provoca inestabilidad financiera y un aumento de los niveles de pobreza.

4.1.2 Migración rural

Entre los productores de cacao, la migración de los jóvenes es un problema apremiante que amenaza la sostenibilidad de la producción y los medios de vida rurales. Cada vez más jóvenes deciden abandonar sus comunidades rurales para trasladarse a zonas urbanas, impulsados por factores como la pobreza, la falta de oportunidades económicas, el acceso limitado a la educación y la atención médica, y la percepción de que la agricultura es poco atractiva y presenta baja rentabilidad. Este éxodo de jóvenes no solo afecta a la productividad agrícola, sino que también contribuye al ciclo de pobreza en las zonas rurales, ya que la pérdida de trabajadores jóvenes dificulta aún más la viabilidad económica de las comunidades dedicadas al cultivo del cacao.

4.1.3 Igualdad de género

En el África subsahariana, las mujeres que trabajan en las plantaciones de cacao suelen sufrir discriminación por motivos de género y tener un acceso limitado a la tierra, lo que repercute negativamente en su productividad y su bienestar general [35]. Normalmente, las esposas de los productores de cacao participan en actividades no remuneradas, como el cuidado de los niños, al tiempo que contribuyen a las tareas agrícolas. Sin embargo, a menudo no reciben ninguna compensación por su trabajo en la finca, lo que

perpetúa un patrón de desigualdad en el sector. Lamentablemente, el sector del cacao sigue enfrentándose a una importante desigualdad de género, pese a los esfuerzos realizados por entidades tanto privadas como públicas para abordarla.

4.2 Retos ambientales

4.2.1 Deforestación y monocultivos

La expansión de las plantaciones de cacao ha sido un factor importante en la deforestación y el cambio en el uso del suelo, lo que a menudo conduce a prácticas ilegales que agravan las emisiones de carbono y la degradación ambiental [24]. Convertir bosques en plantaciones de cacao libera el carbono almacenado y reduce el potencial de secuestro de carbono de los ecosistemas forestales. En respuesta a estos desafíos, la Unión Europea ha promulgado el Reglamento de la UE sobre la deforestación (EUDR), que exige que todo el cacao importado a la UE proceda de tierras que no hayan sido deforestadas desde el 31 de diciembre de 2020. Esta normativa tiene por objeto garantizar que la producción de cacao esté alineada con prácticas sostenibles, respondiendo así a la demanda de los consumidores por productos éticamente obtenidos. Dado que Europa representa más de la mitad de las importaciones mundiales de cacao, el cumplimiento de estas normativas es esencial para los proveedores, quienes deben demostrar la trazabilidad y el cumplimiento de la legislación ambiental [25].

El monocultivo en la producción de cacao es otro factor importante que contribuye a la degradación ambiental, amenazando tanto los medios de vida de los agricultores como la salud de los ecosistemas tropicales. La producción de cacao en América Latina y África suele reflejar dos sistemas distintos: la agroforestería y el monocultivo. En América Latina, los sistemas agroforestales imitan a los bosques naturales y ofrecen beneficios tales como una mayor fertilidad del suelo, una menor presión de plagas y enfermedades, y el control de la erosión. Estos sistemas promueven la sostenibilidad ambiental al tiempo que diversifican los ingresos de los agricultores. Por el contrario, el cacao en África se cultiva predominantemente en monocultivos, que son menos sostenibles desde el punto de vista ambiental y más vulnerables a la degradación del suelo, así como a plagas y enfermedades [26].

4.2.2 Uso de fertilizantes químicos

Para mantener la productividad en suelos degradados, los productores de cacao suelen recurrir al uso intensivo de fertilizantes químicos y pesticidas. Si bien estas prácticas pueden aumentar el rendimiento de los cultivos, también alteran las comunidades microbianas del suelo, reducen la fertilidad natural y contribuyen a la acidificación del suelo y a las emisiones de carbono. Además, cuando el uso intensivo de fertilizantes supera la capacidad de absorción del suelo, los fertilizantes se filtran en las fuentes de agua, dañando los ecosistemas acuáticos a través de la contaminación del agua, la eutrofización y la destrucción de los hábitats naturales [27]. Además de los fertilizantes, la gran dependencia de los pesticidas químicos en el cultivo del cacao agrava aún más la degradación ambiental. Estos productos químicos pueden contaminar el suelo y las masas de agua, lo que tiene efectos perjudiciales tanto para los ecosistemas como para la salud humana [28], [29].

4.2.3 Residuos en el suelo

La producción de cacao genera aproximadamente 700.000 toneladas de residuos al año, con cerca del 75% del fruto del cacao siendo descartado [30]. La biomasa residual incluye materiales orgánicos que se degradan lentamente en el suelo. Cuando estos materiales no se gestionan adecuadamente, se ha identificado que estos se descomponen en condiciones de poca aireación, lo que provoca la liberación de metano, un potente gas de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático. Además, se ha observado que los residuos acumulados pueden servir como caldo de cultivo para plagas y enfermedades, afectar la calidad del suelo por la lixiviación de nutrientes y la

acidificación, así como contaminar las fuentes de agua cercanas con la escorrentía [31].

4.2.4 Procesamiento e Industrialización

En la cadena de suministro del chocolate, se identifican procesos que consumen mucha energía, como son la fermentación, el secado y la producción del chocolate en sí, los cuales contribuyen significativamente a las emisiones de carbono, junto con la producción y el transporte de insumos como el azúcar y los lácteos [32]. La producción y eliminación de envases no biodegradables aumenta aún más la huella ecológica. La elección cuidadosa de productos con menor impacto ambiental, derivados de un mejor manejo de su cultivo y procesamiento, podría mejorar el rendimiento del sistema.

4.2.5 Transporte

El transporte de los granos de cacao desde las fincas hasta las instalaciones de procesamiento y, finalmente, hasta los mercados internacionales representa una contribución significativa a la huella de carbono asociada a la producción de chocolate. El proceso consta de tres etapas principales: en primer lugar, los granos de cacao se transportan en camión desde el lugar de cultivo hasta el puerto de salida; en segundo lugar, se envían por mar a los países productores de chocolate; y, por último, se transportan en camión desde el puerto hasta las fábricas de procesamiento. Las emisiones generadas durante esta fase de transporte dependen de las distancias recorridas [32].

La Figura 1 muestra las fuentes de impacto ambiental a lo largo de la cadena de valor del cacao.



Figura 1 Fuentes de impacto ambiental a lo largo de la cadena de valor del cacao

5. Aprovechamiento de los residuos biológicos del cacao dentro de la cadena de valor

La valorización de los residuos biológicos del cacao ofrece una prometedora respuesta a los urgentes desafíos sociales, ambientales y financieros a los que se enfrenta la industria. Al aprovechar el potencial de estos subproductos, los agricultores pueden acceder a nuevas fuentes de ingresos, reduciendo su vulnerabilidad ante las fluctuaciones de los precios del cacao y mejorando sus medios de vida.

Al mismo tiempo, desviar los residuos de los campos y bosques ayuda a mitigar potencialmente la degradación ambiental, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y apoyando un manejo más sostenible de la tierra. Es importante destacar que estos enfoques innovadores fomentan un sector cacaotero más resiliente y circular, alineando el crecimiento económico con la gestión ambiental y el progreso social. Con base en una revisión de la literatura científica, las siguientes secciones presentan los diferentes tipos de residuos biológicos identificados a lo largo de la cadena de valor del cacao, su manejo actual y las posibles alternativas de valorización.

5.1 Mazorcas de cacao

La mazorca del cacao se refiere a la parte exterior del fruto, que se caracteriza por su estructura rugosa, ovalada y moderadamente gruesa. La cáscara proporciona resistencia contra las condiciones climáticas, las plagas y otros daños. La mazorca se obtiene después de retirar los granos y representa entre el 67% y el 76% del peso seco del fruto del cacao. Por lo tanto, por cada tonelada de granos de cacao secos, se estima que se producen aproximadamente diez toneladas de mazorcas húmedas [36], [37]. El color, el grosor y el peso total de la mazorca de un fruto de cacao maduro pueden variar en función de la variedad.



Las mazorcas de Forastero, por ejemplo, comienzan siendo verdes y se vuelven amarillas a medida que maduran. Las mazorcas de Criollo pueden cambiar de verde o rojo a amarillo o naranja, mientras que las mazorcas de Nacional cambian de verde a amarillo o naranja cuando maduran.

La mazorca tiene un contenido de humedad relativamente bajo, alrededor del 10%. Su composición nutricional es aproximadamente un 43% de fibra (es decir, hemicelulosa, celulosa, lignina y pectina), un 45% de azúcares y un bajo nivel de grasa, del 0,48%. Además, contiene una cantidad significativa de polifenoles¹, 21 g/kg de mazorcas [38].

La práctica actual para el manejo de las mazorcas consiste en que los agricultores habitualmente las dejan en el campo para que se descompongan y se conviertan en fertilizante orgánico. Este método permite reciclar los nutrientes y los devuelve al suelo, mejorando la fertilidad y favoreciendo la producción de cacao. Sin embargo, esta práctica genera un entorno cuasi anaeróbico en las mazorcas apiladas que produce metano, un gas de efecto invernadero (GEI) nocivo que contribuye al cambio climático.

Además, la práctica de dejar mazorcas sin tratar en la tierra puede derivar importantes problemas fitosanitarios, como la atracción de plagas y el fomento de enfermedades fúngicas, como la enfermedad de la mazorca negra. La mazorca negra, causada por el hongo *Phytophthora*, se presenta como pequeñas lesiones oscuras en la mazorca del cacao que se extienden rápidamente por el exterior y el interior del fruto, incluyendo los granos y la pulpa. Esta enfermedad ocasiona pérdidas significativas en las cosechas a nivel mundial, con reducciones anuales de la productividad del 20 al 30%, y pérdidas a nivel de las fincas agrícolas que oscilan entre el 30% y el 90% [37], [39].

5.1.1 Alternativas de valorización

Es ampliamente conocido que los residuos en descomposición procedentes de las actividades de recolección del cacao (es decir, mazorcas, residuos de poda y residuos de árboles de sombra) influyen considerablemente en la fertilidad del suelo de las plantaciones, ya que facilitan el ciclo interno de la materia orgánica y los nutrientes. De hecho, la mayor parte de la variabilidad en el contenido de nutrientes de la cosecha de cacao se atribuye a las diferencias en el contenido de nutrientes de la mazorca, más que al de los granos [40].

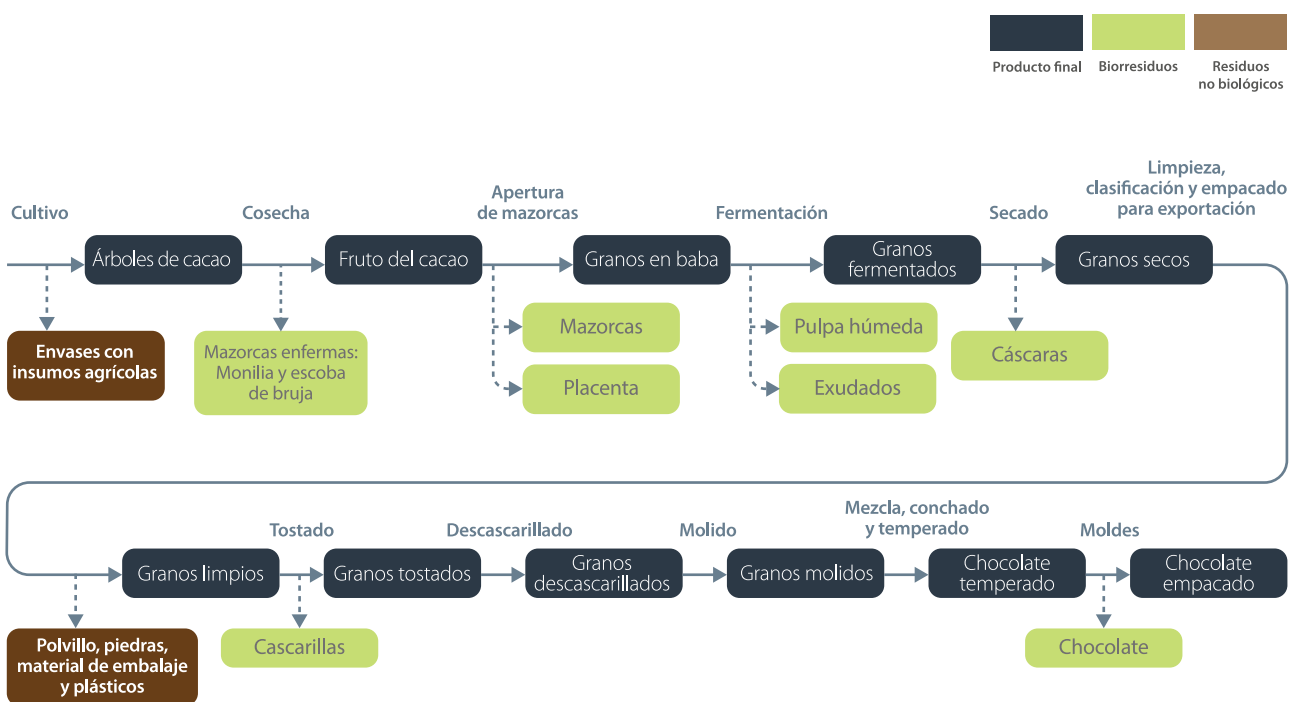


Figura 2 Residuos biológicos y no biológicos que se generan en la cadena de valor del cacao.

¹ Los polifenoles del cacao son antioxidantes naturales, principalmente flavonoides, que se encuentran en el cacao. Pueden ofrecer beneficios para la salud, como favorecer la salud cardíaca, combatir el daño celular y proteger la función cerebral.

Por lo tanto, las investigaciones actuales sugieren que otorgar otros usos a las mazorcas, distintos de la materia orgánica del suelo (MOS), podría dar lugar a importantes deficiencias de nutrientes en los cultivos, una mala calidad del suelo y una mayor dependencia de los fertilizantes químicos comprados [41].

Así pues, se deben considerar las siguientes alternativas de valorización después de evaluar su impacto en la calidad del suelo, la productividad agrícola y la situación financiera de los agricultores. No reconocer estas dinámicas podría tener consecuencias no deseadas al afectar los medios de vida de los agricultores y contrarrestar los objetivos bien intencionados de las estrategias de valorización de residuos.

5.1.1.1 Fertilizante

Dado su alto contenido en potasio, las mazorcas de cacao pueden servir como una alternativa eficaz a los fertilizantes, lo que podría reducir la dependencia de productos sintéticos. La mazorca puede procesarse en diversas formas, incluyendo compost (es decir, material orgánico descompuesto mediante un proceso controlado), mantillo y fertilizantes líquidos, ofreciendo opciones versátiles para su aplicación en prácticas agrícolas [42]. En el compostaje, los residuos de las mazorcas de cacao son añadidos a las pilas de compost para mejorar el perfil de nutrientes del suelo. Se ha demostrado que el compost de la mazorca aumenta las concentraciones de carbono (C), nitrógeno (N) y potasio (K) en el suelo, además de mejorar la retención de humedad, en comparación con la mazorca de cacao sin compostar.

5.1.1.2 Alimentación animal

La industria ganadera se ha visto afectada por el aumento de los costes de los piensos convencionales, lo que ha provocado una creciente necesidad de fuentes alternativas de alimentación. Debido a su alto contenido nutricional y a las importantes cantidades que se generan como subproducto del cultivo de cacao, las mazorcas de cacao pueden convertirse en un alimento alternativo en la producción ganadera, sustituyendo los ingredientes tradicionales utilizados en la nutrición animal. Las investigaciones indican que la mazorca sin

fermentar puede servir como sustrato rico en nutrientes para la alimentación animal, ya que contiene proteínas (5,9-9,1%), fibra bruta (22,6-35,7%), grasa bruta (1,2-10%) y varios minerales (K, Ca y P) esenciales para la salud animal [21].

5.1.1.3 Biocarbón

El biocarbón se obtiene calentando residuos de biomasa a temperaturas de 450-700 °C, en un ambiente con bajo oxígeno, para evitar la combustión completa en un proceso conocido como pirolisis [44]. Los beneficios ambientales y agrícolas de la producción de biocarbón a partir de mazorcas de cacao están bien documentados en la literatura científica. Se ha demostrado que mejora la calidad del suelo, aumenta la retención de nutrientes y el rendimiento de los cultivos, neutraliza los suelos ácidos gracias a su alcalinidad, mitiga problemas de gestión de residuos y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el almacenamiento de carbono a largo plazo [45]. Mientras que la deforestación provocada por el cultivo del cacao libera carbono a la atmósfera, el biocarbón captura carbono en el suelo durante siglos. En conjunto, la incorporación del biocarbón a las prácticas agrícolas no solo se ajusta a los objetivos de sostenibilidad, sino que también mejora la rentabilidad del cultivo del cacao mediante el aumento de los rendimientos y la reducción de los costos asociados con fertilizantes y riego, especialmente en regiones donde el cacao es el principal cultivo comercial.

El biocarbón a partir de las mazorcas de cacao también ha sido ampliamente estudiado por su capacidad para absorber metales pesados. Se ha informado que puede eliminar metales tóxicos como el plomo, el mercurio y el cadmio del agua contaminada, lo que lo convierte en un adsorbente sostenible [46]. Esta capacidad de adsorción se atribuye a su estructura porosa y a su gran superficie, que facilitan la unión de los iones metálicos [47]. Además de sus beneficios ambientales, el biocarbón también puede servir como precursor para la producción de carbón activado, que es valioso en diversos usos industriales, como la purificación del agua y la filtración del aire [48]. Por último, también se ha demostrado que la incorporación de biocarbón en materiales compuestos mejora sus propiedades mecánicas [49].

5.1.2 Sistema de producción de biocarbón

Actualmente existen varios métodos para la producción de biocarbón (ver Tabla 4). Los métodos de bajo costo, como el horno Kon-tiki, ofrecen importantes ventajas, entre ellas la asequibilidad para los pequeños agricultores, la reducción de las emisiones y un rendimiento de biocarbón del 20-30%. Sin embargo, los sistemas por lotes como el Kon-tiki presentan limitaciones de escalabilidad y a operaciones que demandan mucha mano de obra. Por el contrario, los pirolizadores industriales (ej., los hornos de tambor o rotativos) permiten un procesamiento continuo y mayores volúmenes, lo que ofrece eficiencia para

las cooperativas más grandes. Sin embargo, estos sistemas requieren una inversión de capital considerable, conocimientos técnicos y fuentes de energía, lo que supone un riesgo de exclusión para los agricultores con recursos limitados. Es importante destacar que las propiedades del biocarbón pueden variar significativamente en función de la materia prima y las condiciones de pirólisis, lo que implica que las formulaciones de biocarbón adaptadas pueden dar resultados diferentes en términos de crecimiento de las plantas, salud del suelo y eficiencia de secuestro de carbono [50].

Tabla 4 Sistemas de producción de biocarbón

Atributos	Horno tradicional de montículo de tierra	Horno "Kon-Tiki"	Horno de retorta	Carbonización hidrotérmica	Gasificación
Rango de temperatura	300-450°C	600-700°C	300-700°C	180-300°C	750-900°C
Tiempo de proceso	Días	1-2 horas	Horas	Horas	Minutos
Requisitos de materia prima	Biomasa seca	Biomasa seca	Biomasa secas	Biomasa húmeda o seca	Biomasa seca
Tamaño típico del lote (kg)	100-1000	50-500	100-1000	10-1000	Continuo
Coste de capital	Muy bajo	Bajo	Alta	Alta	Muy alto
Complejidad operativa	Bajo	Bajo	Moderado	Moderado	Alto
Control de calidad del biocarbón	Bajo	Moderado	Alta	Alta	Moderado
Recuperación de subproductos	No	Limitado (solo calor)	Sí (bioaceite, gas de síntesis)	Sí (agua)	Sí (gas de síntesis)
Control de emisiones	Pobre	Moderado	Bueno	Excelente	Bueno
Escalabilidad	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Alto
Rendimiento típico ²	10-20%	20-30%	30-40%	50-80%	10-15%

5.1.2.1 Productos farmacéuticos, nutracéuticos y aditivos alimentarios

Otro uso potencial de las mazorcas es la extracción de teobromina, un alcaloide bioactivo que tradicionalmente se obtiene de los granos de

cacao y que tiene efectos estimulantes sobre el sistema nervioso central, gastrointestinal, cardiovascular, renal y respiratorio. Se indica que

² Porcentaje de la materia prima de biomasa original que se convierte en biocarbón durante el proceso de pirólisis.

los métodos de extracción específicos pueden producir cantidades significativas de teobromina a partir de las mazorcas de cacao, que pueden utilizarse en diversas aplicaciones, desde productos farmacéuticos (ej., como precursor de broncodilatadores y diuréticos), hasta nutraceuticos (ej., en suplementos para la salud cardiovascular y cognitiva), y aditivos alimentarios (ej., como saborizante amargo en chocolates especiales y refrescos funcionales) [51].

5.2 Pulpa o mucílago

Cuando se cosechan, los granos de cacao están rodeados por una mucílago dulce, ácido y aromático que resulta agradable al paladar y se conoce como pulpa o mucílago. Se ha demostrado que la composición de la pulpa del cacao y su actividad enzimática varían en función de la variedad de cacao, la temporada de cosecha, el grado de madurez y el país de origen³ [54]. Estas diferencias muestran su potencial idoneidad para diferentes aplicaciones.

La pulpa de cacao es ampliamente reconocida por su composición nutritiva, que suele contener entre un 10–13% de azúcares (principalmente sacarosa, glucosa y fructosa), alrededor 1–3% ácidos orgánicos como el ácido cítrico, y proporciones notables de polisacáridos como la pectina (3,7–6,6%), hemicelulosa (1,5–2,8%), y celulosa (4,7–5,1%) [55]. La pulpa de cacao también contiene proteínas, aminoácidos, vitaminas (principalmente vitamina C) y otros minerales.

La pulpa es un componente esencial en la fermentación del cacao, principalmente debido a su alto contenido en azúcar y a la presencia de diversos compuestos que sirven de sustrato para la actividad microbiana. Durante la fermentación, la pulpa no solo alimenta los procesos metabólicos de los microorganismos, sino que también influye en el desarrollo del aroma característico del cacao. Esto se atribuye a la posible migración de compuestos aromáticos de la pulpa al tejido del grano. Además, la pulpa se considera un reservorio que contribuye al sabor y la finura generales del producto final de cacao [56].

5.2.1 Alternativas de valorización

Aunque la pulpa del cacao se ha utilizado tradicionalmente en el proceso de fermentación de los granos de cacao, investigaciones recientes y la experiencia de la industria indican que parte de la pulpa del cacao puede separarse de los granos de forma segura antes de la fermentación, sin afectar negativamente al sabor de los granos [57]. A continuación, se presentan algunas de las aplicaciones actuales de la pulpa de cacao.

5.2.2 Jugos y refrescos

Después de cosechar las mazorcas de cacao, los granos y la pulpa que los rodea se separan mecánicamente. A continuación, la pulpa se prensa para extraer su jugo, que es rico en azúcares y ácidos orgánicos. Para garantizar la seguridad y estabilidad microbiana, el jugo se pasteuriza normalmente (i.e., se calienta a una temperatura específica durante un tiempo determinado) antes de almacenarlo o procesarlo posteriormente. La pasteurización no solo prolonga la vida útil del jugo, sino que también ayuda a mantener sus cualidades nutricionales y sensoriales para un uso posterior. En este punto, puede consumirse directamente como un refresco o como ingrediente para cócteles con o sin alcohol, batidos o bebidas carbonatadas.

De hecho, la pulpa de cacao se ha utilizado históricamente en bebidas en todas las regiones productoras de cacao, especialmente en América Central y del Sur. En países como Ecuador, Venezuela, Perú y México, se registra que la pulpa de cacao cruda se ha consumido directamente de las mazorcas recién abiertas desde tiempos inmemoriales. Su dulzura y exótica acidez tropical, con perfiles de sabor similares a los del lichi, el mango, los cítricos y el durazno, la convierten en una alternativa naturalmente refrescante e hidratante en climas cálidos. La pulpa de cacao pasteurizada y congelada ha sido recientemente aprobada por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) en lo que respecta a la seguridad alimentaria, con el objetivo de comercializarla en la Comunidad Europea (EC) (EFSA, 2019). Finalmente, la pulpa de cacao también puede procesarse en jarabes o gelatinas para su uso en postres y repostería en general.

³ Por ejemplo, Bickel Haase et al. (2021) detectaron hasta 65 sustancias aromáticas activas diferentes en la pulpa. Según los investigadores, la mayor diversidad de olores se encontró en la pulpa vietnamita (con notas grasas, verdes y ahumadas), mientras que la pulpa de cacao de Camerún presentó las intensidades de sabor más bajas (con cualidades olfativas similares a la mantequilla, las palomitas de maíz, las flores y las frutas) [53]



5.2.3 Pulpa pulverizada

Después de extraer el jugo de la pulpa, la fracción sólida restante, que comprende material fibroso, azúcares residuales y otros compuestos bioactivos, puede someterse a un procesamiento adicional. Este material se seca y luego se pulveriza, lo que da como resultado un polvo fino de pulpa de cacao. El proceso de secado ayuda a preservar las propiedades nutricionales y funcionales de la pulpa, mientras que la pulverización aumenta su versatilidad para diversos usos. Entre sus aplicaciones se incluye el uso de la pulpa pulverizada como edulcorante y fuente de fibra para alimentos y productos de panadería, como el chocolate y otros productos de panadería, bebidas y batidos, así como aperitivos y cereales (para mayor valor nutricional y sabor). La pulpa de cacao pulverizada también es adecuada para su inclusión en suplementos dietéticos destinados a promover la salud digestiva y el bienestar general, así como ingrediente probiótico que sirve de sustrato prebiótico para las bacterias intestinales beneficiosas.

5.2.4 Bebidas alcohólicas fermentadas: vino de cacao y cerveza

Debido a que la pulpa de cacao se caracteriza por un alto contenido de azúcares fermentables (es

decir, glucosa, fructosa, maltosa), es adecuada para vinos y cervezas, mediante fermentación con levaduras [58]. Para el vino de cacao, el jugo pasteurizado se inocula con levaduras seleccionadas o silvestres, que convierten los azúcares en etanol y otros compuestos aromáticos durante un período de una a varias semanas. La bebida resultante puede añejarse para desarrollar un perfil de sabor más complejo, que va desde afrutado y ligeramente dulce hasta ácido, dependiendo de la duración de la fermentación y el envejecimiento. Estudios indican que las diferentes cepas de levadura pueden conferir cualidades sensoriales distintas al vino, lo que pone de relieve la importancia de la selección de cepas para determinar la calidad del producto final [59].

En la cerveza, la pulpa de cacao también se utiliza cada vez más en la producción de cerveza, donde se añade al mosto de malta para mejorar la fermentación y el sabor. Los estudios han demostrado que la incorporación de pulpa de cacao aumenta significativamente la concentración inicial de azúcares fermentables en el mosto, lo que potencia la actividad de la levadura, la producción de etanol y la formación de ésteres deseables que contribuyen al aroma y el sabor de la cerveza. Las evaluaciones sensoriales

han demostrado que la cerveza producida con pulpa de cacao como aditivo es bien aceptada por los consumidores, ya que a menudo presenta un perfil de sabor distintivo y una mayor complejidad aromática en comparación con las cervezas tradicionales a base de malta [60].

5.2.5 Bebidas fermentadas sin alcohol: Kombucha y kéfir

La kombucha es una bebida fermentada tradicional que ha evolucionado hasta incluir una amplia gama de sustratos, incluidos los jugos de frutas y nuevos ingredientes como la pulpa de cacao. El proceso comienza combinando un líquido rico en azúcar, como el jugo de pulpa de cacao, con un cultivo simbiótico de bacterias y levaduras (SCOBY). Luego, la mezcla se fermenta durante varios días a temperatura ambiente, normalmente entre 4 y 15 días, dependiendo del sabor y la acidez deseados [61]. El proceso de fermentación no solo aumenta el contenido probiótico de la bebida, sino que, según reportes, también mejora su digestibilidad y sus posibles beneficios para la salud, entre los que se incluyen el refuerzo de la función inmunitaria y la salud intestinal [62]. La kombucha es adecuada para una amplia base de consumidores, incluidos aquellos que buscan opciones de bebidas sin alcohol, bajas en calorías y funcionales.

El Kéfir es otra bebida fermentada tradicionalmente elaborada con leche. Sin embargo, el kéfir de agua (fermentado en agua azucarada con o sin jugos de frutas), ha ganado popularidad como alternativa sin lácteos. El proceso consiste en inocular el jugo con granos de kéfir, que contienen una compleja comunidad de bacterias y levaduras. Durante varios días, estos microorganismos metabolizan los azúcares y producen una bebida ligeramente efervescente y ácida, rica en probióticos. El kéfir de agua elaborado con pulpa de cacao es adecuado para consumidores veganos, intolerantes a la lactosa y alérgicos a los lácteos, y se puede aromatizar con frutas o hierbas para mejorar su atractivo sensorial [62].

5.2.6 Otros usos alimentarios

Hay registros de que la pulpa de cacao se utiliza cada vez más en otros productos alimenticios, como helados, yogures, sorbetes y bebidas,

ofreciendo combinaciones de sabores innovadoras que pueden ayudar a diferenciar los productos en un mercado competitivo. Su dulzura natural y notas de frutas tropicales añaden un toque único a los postres cremosos, permitiendo a los fabricantes reducir el azúcar añadido mientras mejoran la sensación en boca y la frescura. Por ejemplo, las mezclas de helado y sorbete de pulpa de cacao combinan el sabor ácido de la pulpa fresca con vainilla u otros sabores frutales, creando delicias refrescantes y distintivas que gustan tanto a los consumidores como a los catadores [63], [64].

Más allá de los postres helados, la pulpa de cacao también se incorpora a snacks y yogures lácteos o vegetales, aprovechando sus beneficios nutricionales y su dulzor natural. Proyectos innovadores, como los helados de yogur elaborados con pulpa de cacao, demuestran sostenibilidad e innovación de productos al proporcionar a los agricultores fuentes de ingresos adicionales y reducir el desperdicio de alimentos. Estos usos destacan la versatilidad de la pulpa de cacao como ingrediente funcional que realza el sabor, la textura y el valor nutricional en diversas categorías de alimentos [65], [66].

5.2.7 Nutracéuticos

La pulpa de cacao presenta importantes propiedades antioxidantes debido a su alto contenido en compuestos fenólicos, lo que la convierte en un ingrediente prometedor en el sector nutracéutico [67]. Estos compuestos fenólicos ayudan a neutralizar los radicales libres, reduciendo el estrés oxidativo y disminuyendo potencialmente el riesgo de enfermedades crónicas. Además de los antioxidantes, la pulpa de cacao contiene vitaminas, minerales y fibra dietética que contribuyen a su perfil beneficioso para la salud, lo que respalda su uso en alimentos funcionales y suplementos [68].

5.3 Jugo o miel de cacao

El jugo del cacao, también llamado miel de cacao o exudado de cacao, es un líquido translúcido que libera la pulpa durante el procesamiento posterior a la cosecha del cacao. El jugo comienza a liberarse desde la recolección de los frutos, pero la mayor parte se libera durante el proceso de fermentación, en el que varios microorganismos presentes en el fruto y en los lugares de procesamiento (levaduras

y bacterias acidófilas) realizan la hidrólisis y solubilización del mucílago. Los jugos poseen atributos químicos y sensoriales similares a los de la pulpa original [69]. Por cada tonelada de cacao húmedo, se estima que se producen entre 100 y 150 litros de jugo de cacao [37].

El exudado se drena a través de fisuras en los contenedores o montones de fermentación y termina en el suelo. El alto nivel de acidez de la pulpa de cacao puede provocar la acidificación del suelo cuando el jugo se desecha en el campo, lo que conduce al deterioro de la fertilidad del suelo. No obstante, en varios países productores de cacao se están llevando a cabo múltiples prácticas de valorización con el objetivo de facilitar el drenaje y la recolección adecuadas de las exudaciones de cacao durante el proceso de fermentación [69]. A pesar de su rico perfil nutricional y sus posibles usos, como edulcorante natural en bebidas y como sustrato para cultivos probióticos, la miel de cacao no se ha comercializado plenamente. A menudo se produce en pequeñas cantidades y está sujeta a una rápida fermentación debido a su alto contenido en azúcar, lo que limita su vida útil [70].

5.4 Cascarillas

Las cascarillas de los granos de cacao son un subproducto importante que se genera durante los procesos de tostado y separación de la producción de cacao, y representan aproximadamente entre el 10% y el 20% del peso total de los granos de cacao [71].

Estas cascarillas se separan de los granos después del tostado, cuando el calor hace que se aflojen, lo que facilita su eliminación. Ricas en fibra dietética, materiales lignocelulósicos, proteínas y compuestos bioactivos como polifenoles, metilxantinas (teobromina y cafeína), y ácidos grasos, las cascarillas de los granos de cacao poseen notables propiedades antioxidantes y valor nutricional [72].

Debido a su alto contenido en fibra y compuestos bioactivos, las cascarillas de los granos de cacao tienen diversos usos más allá de su eliminación. Se utilizan como ingredientes alimentarios funcionales, antioxidantes naturales y suplementos de fibra dietética, contribuyendo a la elaboración de productos que promueven la salud [73]. Además, sirven como materia prima para la alimentación animal, fertilizantes orgánicos, biocombustibles, producción de papel y cosméticos, lo que respalda las prácticas sostenibles y los modelos de economía circular dentro de la industria del cacao [72]. La valorización de las cascarillas no solo reduce el impacto ambiental, sino que también crea oportunidades económicas al transformar lo que antes se consideraba un residuo en materiales valiosos y multifuncionales.



6. Un estudio de caso sobre la cadena de valor agroindustrial del cacao ecuatoriano-suizo

Mediante el análisis de la cadena de valor del cacao ecuatoriano-suizo, se busca comprender el estado actual del manejo de residuos biológicos, identificar oportunidades para su valorización y descubrir las principales barreras para su implementación. La información recopilada sirve como punto de partida para diseñar estrategias específicas destinadas a promover prácticas de economía circular en sistemas agroindustriales similares.

6.1 La industria del cacao ecuatoriano

Ecuador tiene una larga historia como exportador de cacao, con un cultivo que se remonta a más de 5.000 años, lo que lo convierte en parte integral de la identidad y el desarrollo económico del país desde la época precolombina. De hecho, las pruebas arqueológicas sugieren que el *Theobroma cacao* L. fue domesticado hace unos 5.300 años por la cultura Mayo-Chinchipe en el territorio actualmente conocido como Zamora Chinchipe, en la Amazonía ecuatoriana [75], [76]. A mediados del siglo XVIII, los cambios en las políticas comerciales coloniales desencadenaron el primer auge del cacao en Ecuador, colocando al país como el segundo productor mundial después de Venezuela. El cultivo y la exportación de cacao se convirtieron en elementos centrales de la economía del país y apoyaron los movimientos independentistas a principios del siglo XIX [77].

Hoy en día, Ecuador se posiciona como el tercer mayor exportador mundial de cacao [78]. Después de Costa de Marfil y Ghana, Ecuador aporta el 9% del suministro mundial de cacao. Ecuador es también el mayor exportador de América, con casi 470.000 toneladas de cacao en grano producidas en más de 630.000 hectáreas en 2024. En general, el cacao representa el tercer producto de



exportación no petrolero más importante de Ecuador, solo por detrás del camarón y el banano, y aportando un 5% al PIB del país y generando más de US\$3.600 millones en 2024.

En conjunto, la cadena de valor del cacao en Ecuador abarca la producción de granos, las prácticas postcosecha y el procesamiento, en las que participan numerosos agricultores, intermediarios y exportadores [79]. Existen dos vías principales de comercialización del cacao: una mediante intermediarios, quienes se encargan del acopio y de la comercialización hacia los exportadores, y otra ruta de exportación directa utilizada por un número reducido de empresas [80].

En 2017, la mayor parte del cacao se exportó en forma de granos (87%), y solo una pequeña proporción fue transformada en productos semiacabados o acabados [81]. A pesar de los retos que plantea la capacidad de procesamiento dentro del país, el cacao ecuatoriano continúa siendo esencial tanto para la fabricación de chocolate como para otras industrias, como la cosmética y la farmacéutica.

6.1.1 Dos variedades principales

La producción de cacao ecuatoriano se caracteriza por dos variedades principales: (i) el cacao fino de aroma Nacional, conocido por su denominación "Arriba", y (ii) el clon CCN-51 de alto rendimiento [82]. El nombre "Arriba" tiene su origen en la región de la cuenca del Guayas, donde se cultiva tradicionalmente el cacao Nacional. Los relatos históricos mencionan a compradores europeos que preguntaban a los agricultores locales de dónde procedía el cacao aromático que transportaban. La respuesta de los lugareños era "arriba," que significa "río arriba" o "aguas arriba", indicando que los preciados granos procedían de la cuenca alta del río Guayas. Aunque el Nacional es genéticamente un Forastero, su perfil de sabor único con aromas florales lo distingue y es exclusivo de Ecuador. De hecho, Ecuador se considera uno de los principales proveedores de cacao fino de aroma, con más del 60% de las exportaciones mundiales de cacao de primera calidad.

Históricamente, la producción en el país se centraba principalmente en la variedad Nacional, pero los brotes de enfermedades propiciaron la introducción de variedades más robustas como la

CCN-51. La variedad CCN-51 (Colección Castro Naranja N. 51) se desarrolló a principios de la década de 1960. Esta variedad es resistente a las enfermedades y altamente productiva, representando el 57% de la superficie cultivada en Ecuador y el 72% de la producción total de cacao del país. Si bien la CCN-51 presenta mayor peso y contenido de grasa, sus cualidades organolépticas son consideradas menos atractivas en comparación con la variedad Nacional, lo que la reduce su demanda entre los fabricantes de chocolate de alta gama. Sin embargo, la mayor productividad de la CCN-51 y la creciente demanda internacional de cacao han impulsado la expansión de su cultivo [83].

6.2 La industria chocolatera suiza

Suiza produce alrededor de 180.000 toneladas de chocolate al año, de las cuales aproximadamente el 61% se exporta al extranjero. La industria chocolatera es una parte fundamental de la economía suiza y de la identidad nacional, ya que el chocolate suizo simboliza la calidad, la tradición y la innovación. En 2021, Suiza importó aproximadamente 52.000 toneladas de cacao, por un valor de €145 millones, principalmente de Ghana (55%) y Ecuador (23%) [84]. Aproximadamente un tercio de estas importaciones consistió en granos de cacao de sabor fino, siendo Ecuador el principal proveedor en esta categoría [85]. Los consumidores suizos tienen el mayor consumo per cápita de chocolate a nivel mundial, con un promedio de unos 11 kg por persona al año, seguidos de cerca por Estonia y Alemania [86].

Suiza cuenta con 16 fabricantes de chocolate y numerosas pequeñas y medianas empresas dedicadas a la elaboración de este producto. La sostenibilidad ocupa un lugar cada vez más importante para el sector del cacao, con la Plataforma Suiza para el Cacao Sostenible establecida en 2018. Sus miembros se han comprometido a que, para 2025, al menos el 80% del cacao que utilicen proceda de producciones sostenibles. El mercado del cacao ecológico y de comercio justo también es importante en Suiza, impulsado por la demanda de los consumidores de productos de alta calidad y de origen ético. En 2021, las ventas de productos de cacao de comercio justo alcanzaron las 6.800 toneladas, lo que representa el 14% del total de productos de cacao y chocolate del país [84].



6.3 Metodología

6.3.1 Encuesta

Se empleó un diseño de encuesta transversal para investigar las prácticas en el manejo de residuos biológicos del cacao y las percepciones sobre las alternativas de valorización entre los productores de cacao ecuatorianos. Se optó por un diseño transversal porque se adapta bien a la investigación exploratoria, lo que permite capturar de manera eficiente y con bajo costo una instantánea de las prácticas actuales del manejo de residuos biológicos y las percepciones entre los cacaoteros ecuatorianos. Los agricultores fueron seleccionados para la muestra de la encuesta, ya que representan a los principales gestores de residuos biológicos durante las etapas críticas de la cosecha, el secado y la fermentación de los granos de cacao.

Las preguntas de la encuesta se basaron en una revisión bibliográfica, fueron principalmente de opción múltiple y escalas Likert de 5 puntos, y abarcaban las siguientes secciones: (i) datos demográficos, (ii) productividad agrícola y certificaciones, (iii) aspectos generales de la fermentación, (iv) aspectos generales del secado, (v) manejo y cuantificación de residuos biológicos y no biológicos (ej., contenedores, bolsas), (vi)

barreras percibidas para la valorización, y (vii) atractivo relativo de las distintas alternativas de valorización. La encuesta estuvo disponible en español para adaptarse al idioma de los productores de cacao en Ecuador. Para garantizar la validez, precisión y relevancia de las preguntas propuestas, se realizó una prueba piloto con dos colaboradores científicos de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Berna con experiencia en cacao y chocolate, dos empresas suizas de fabricación de chocolate y una organización no gubernamental (ONG) ecuatoriana que implementa programas de profesionalización para productores de cacao. Los comentarios recibidos en la fase piloto se referían a la formulación de las preguntas, la precisión y la adecuación cultural de la terminología utilizada y la idoneidad de las unidades de medida propuestas.

En colaboración con una ONG ecuatoriana, la encuesta se realizó a un total de 1.034 productores de cacao, principalmente de provincias de la región costera de Ecuador. Esto es representativo de la geografía real del cultivo del cacao en Ecuador, donde las provincias de la región costera representan aproximadamente el 80% de la

producción total de cacao. Además, el tamaño de la muestra se determinó en función de consideraciones prácticas, como la disponibilidad de recursos y la viabilidad de la recopilación de datos en las zonas rurales. Entre julio y octubre de 2024, los técnicos de campo de la ONG realizaron las encuestas en persona y registraron las respuestas directamente en Microsoft Excel (offline) utilizando ordenadores portátiles o tablets. Este enfoque fue necesario debido a que el acceso a internet en las zonas rurales de Ecuador es limitado.

Para analizar las respuestas recopiladas, utilizamos R a través de RStudio, un lenguaje de programación de código abierto empleado para el análisis y la visualización de datos. Además de las estadísticas descriptivas, se agruparon las respuestas en función del tamaño de las fincas agrícolas. Para ello, las fincas se clasificaron en diferentes categorías (es decir, <5 hectáreas, 6-20 hectáreas, 21-50 hectáreas, >50 hectáreas) y, a continuación, se comparó cómo variaban las respuestas a las diferentes preguntas en función del tamaño de la investigación. Por último, se obtuvo el consentimiento de todos los participantes antes de que completaran la encuesta y todos los datos se recopilaron de forma anónima y se mantuvieron confidenciales.
























6.3.2 Entrevistas

Este estudio empleó además un enfoque de investigación cualitativa mediante entrevistas semiestructuradas para explorar el tema de la valorización de los residuos biológicos del cacao. Las entrevistas fueron esenciales para recabar información detallada sobre las experiencias, perspectivas y actitudes de los participantes con respecto al manejo actual y futuro de los residuos biológicos del cacao. Para reclutar a los participantes en este estudio, se utilizó una combinación de métodos de muestreo intencional y por bola de nieve. Los criterios de inclusión se centraron en personas y empresas involucradas en la cadena de valor del cacao y el chocolate, principalmente en Ecuador y Suiza. Mediante el enfoque intencional, se recopiló la información de contacto de posibles entrevistados por correo electrónico o llamadas telefónicas. Además, se utilizó el muestreo por bola de nieve, en el que los entrevistados existentes recomendaban a otros posibles participantes durante la entrevista, ampliando así nuestra red de contactos.

Entre febrero y octubre de 2024, se realizaron un total de 23 entrevistas semiestructuradas, cada una con una duración de entre 30 y 120 minutos. Las entrevistas se llevaron a cabo en línea a través de Microsoft Teams, de Google Meet o en persona. Se obtuvo el consentimiento informado de todos los participantes antes de cada entrevista, incluido el permiso para grabar y transcribir las conversaciones. Esto permitió garantizar la precisión y fiabilidad de los datos recopilados durante las entrevistas. Cuando fue necesario, se revisaron las transcripciones después de la entrevista para ajustarnos lo máximo posible a la conversación original. Se asignaron códigos alfanuméricos para mantener el anonimato de cada uno de los participantes entrevistados, tal y como se detalla en la tabla 1. Entre los participantes se encontraban expertos del sector o académicos (Exp), productores de cacao en el país de origen (Pro), representantes de empresas fabricantes de chocolate (Man), exportadores (Expor), comerciantes (COM), empresas de valorización del cacao (Val), y ONG (ONG).

Todas las transcripciones de las entrevistas estaban disponibles en archivos de Microsoft Word y posteriormente se importaron a MAXQDA, un software de análisis de datos cualitativos. Se codificaron los datos de las entrevistas de forma iterativa para garantizar la fiabilidad entre codificadores y la alineación con el catálogo de codificación del proyecto. El proceso de codificación consistió en categorizar sistemáticamente las respuestas para identificar temas y patrones relevantes para los objetivos de la investigación. El catálogo de codificación se desarrolló a partir de una revisión inicial de la bibliografía sobre la valorización de los residuos biológicos del cacao y se perfeccionó de forma iterativa durante el proceso de codificación.

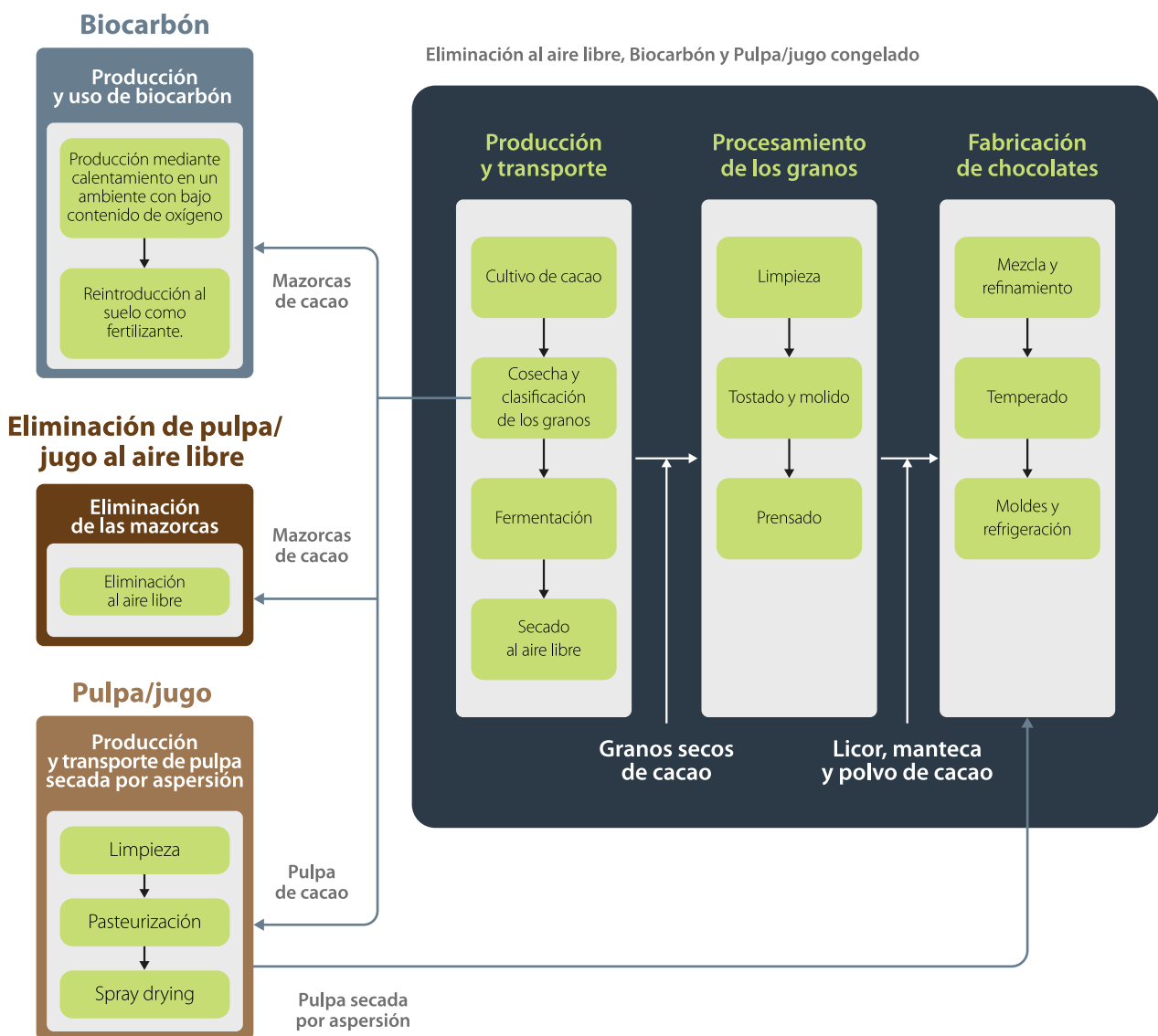
Tabla 5 Lista de entrevistados

N.	Código	País	En línea	Presencial	Agricultor	Intermediario	Exportador/ Comerciante	Fabricante de chocolate	Valorización de subproductos	NGO/Asociación industrial	Investigación
1	Exp01		•							•	
2	Exp02			•							•
3	Exp03		•			•					
4	Exp04		•								•
5	Exp05		•							•	
6	Pro01		•			•					
7	Pro02			•	•			•			
8	Pro03				•		•				
9	Man01			•				•			
10	Man02			•				•			
11	Man03			•				•			
12	Man04			•				•			
13	Xpor01			•		•	•				
14	Tra01			•			•				
15	Val01		•						•		
16	Val02		•						•		
17	Val03		•						•		
18	Val04		•						•		
19	Val05		•						•		
20	Val06		•			•			•		
21	NGO01		•							•	
22	NGO02		•							•	
23	NGO03		•							•	

6.3.3 Análisis del ciclo de vida (ACV)

Por último, se realizó una evaluación del ciclo de vida “de la cuna a la puerta” en OpenLCA (versión 2.2.0) para evaluar el impacto ambiental de tres sistemas de productos, a saber: (i) la descomposición en campo abierto de las mazorcas de cacao (Sistema de Producto 1), (ii) las mazorcas de cacao transformadas en biocarbón (Sistema de producto 2) y (iii) pulpa de cacao deshidratada bajo el método spray dried a utilizarse como sustituto del azúcar en la fabricación de chocolate (Sistema de producto3). Para el análisis, se tomaron en cuenta datos de la bibliografía existente, principalmente estudios de ACV comparables

identificados a través de investigaciones en línea, complementados con datos primarios cuando fue posible. Los factores de emisión se obtuvieron principalmente de procesos específicos disponibles en Ecoinvent versión 3.9. Para la evaluación del impacto, se empleó el método ReCiPe 2016 Midpoint (H). Por último, la unidad funcional para este estudio fue 1 kg de chocolate negro (60 %) procedente de cacao CCN51 cultivado en Ecuador y procesado en Suiza. Se puede solicitar más información sobre este estudio a las autoras.



Los tres sistemas (eliminación en campo abierto, biocarbón y pulpa/jugo) abarcan la producción y el transporte de cacao, la fabricación de granos de cacao y la fabricación de chocolate. El biocarbón y la pulpa/jugo contienen pasos adicionales.

Figura 3 Límites del sistema ACV

6.4 Resultados

6.4.1 Características de las fincas de cacao

Aproximadamente el 80 % de los agricultores encuestados se encontraban en las provincias de Guayas, Los Ríos y Manabí, lo que concuerda con los datos oficiales que indican que estas tres provincias costeras representan el 61,3% de la producción nacional de cacao de Ecuador (Figura 9 y Figura 10). De los 1.034 agricultores encuestados, 76% operaba fincas agrícolas de menos de 5 hectáreas, mientras que el 22% tenía fincas medianas de entre 6 y 20 hectáreas, y solo el 2% poseía fincas grandes de más de 21 hectáreas. Esto también refleja la distribución general del tamaño de las unidades de producción agrícolas en Ecuador.

La variedad de cacao CCN-51 se impuso como el cultivo predominante en todas las categorías de tamaño de finca, revelando que el 84,4% de los pequeños agricultores cultivaban exclusivamente CCN-51, mientras que solo el 4,8% cultivaba la variedad Nacional de forma aislada. Esto se asemeja a las cifras nacionales, que indican que el 98% del cacao cultivado en la provincia de Guayas es CCN-51 y el 2% restante es Nacional [87]. Por último, un 10,8% de los agricultores aplicó una estrategia de cultivo mixto, con variedades CCN-51 y Nacional en la misma parcela (6).

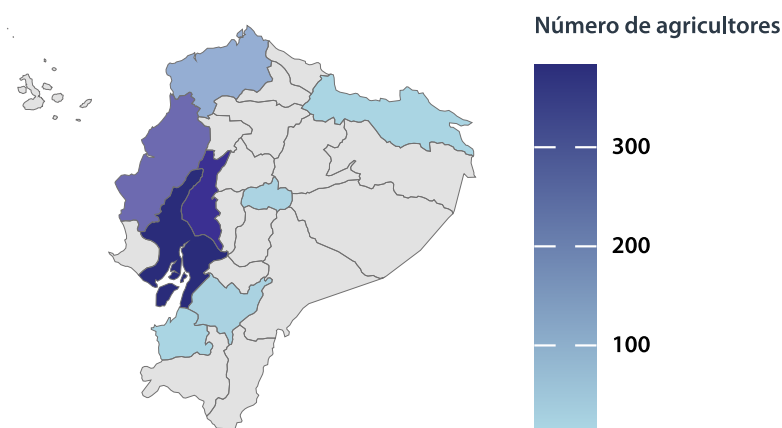


Figura 4 Distribución de los agricultores encuestados (mapa)

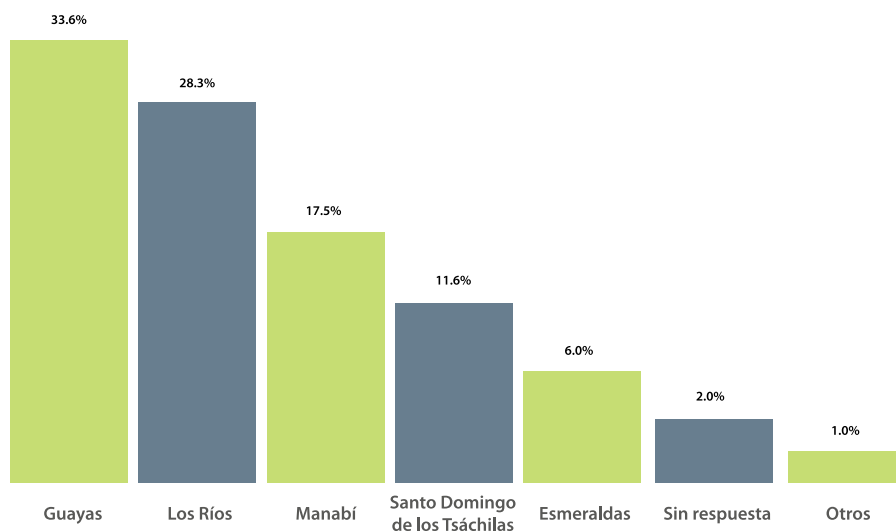


Figura 5 Distribución de los agricultores encuestados por provincia (histograma)

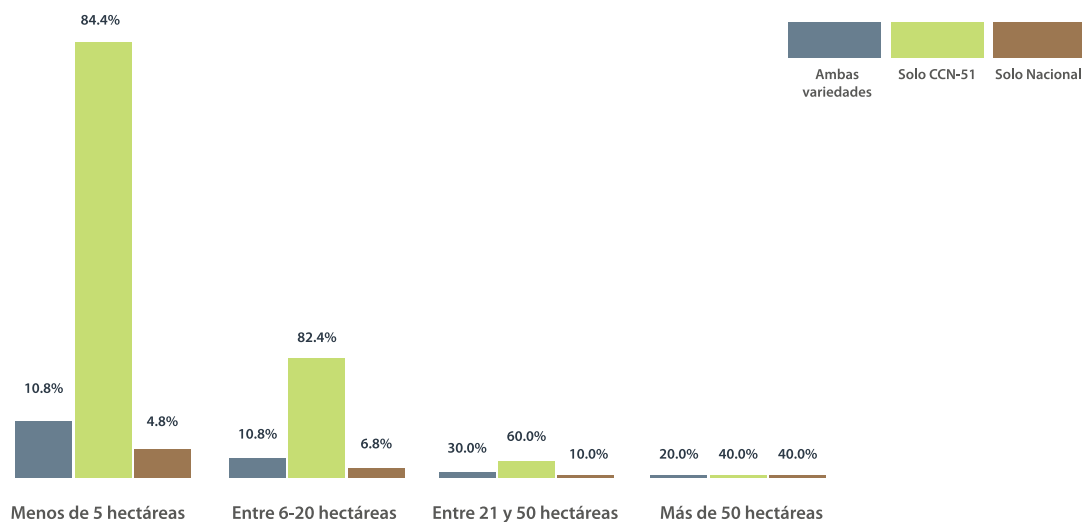


Figura 6 Variedades de cacao cultivadas por tamaño de finca

Aunque las evidencias sugieren que la producción de cacao en la región costera se lleva a cabo en fincas manejadas de forma más intensiva (por ejemplo, monocultivos con riego artificial o con bajos niveles de sombra) [88], las fincas de esta muestra presentaron una destacada diversificación al aplicar prácticas de cultivos intercalados. Por lo tanto, indistinto de su tamaño, los agricultores informaron que además del cacao integraban árboles frutales, especies maderables,

así como plantas medicinales y ornamentales en sus parcelas (Figura 12). Las especies frutales dominantes en sus cultivos fueron el plátano, la yuca, el zapote, el mango y la papaya. Estas especies son consideradas productos básicos y de comercialización adecuados para el consumo familiar, así como una fuente de ingresos complementarios para los agricultores, especialmente durante las fluctuaciones del precio del cacao.

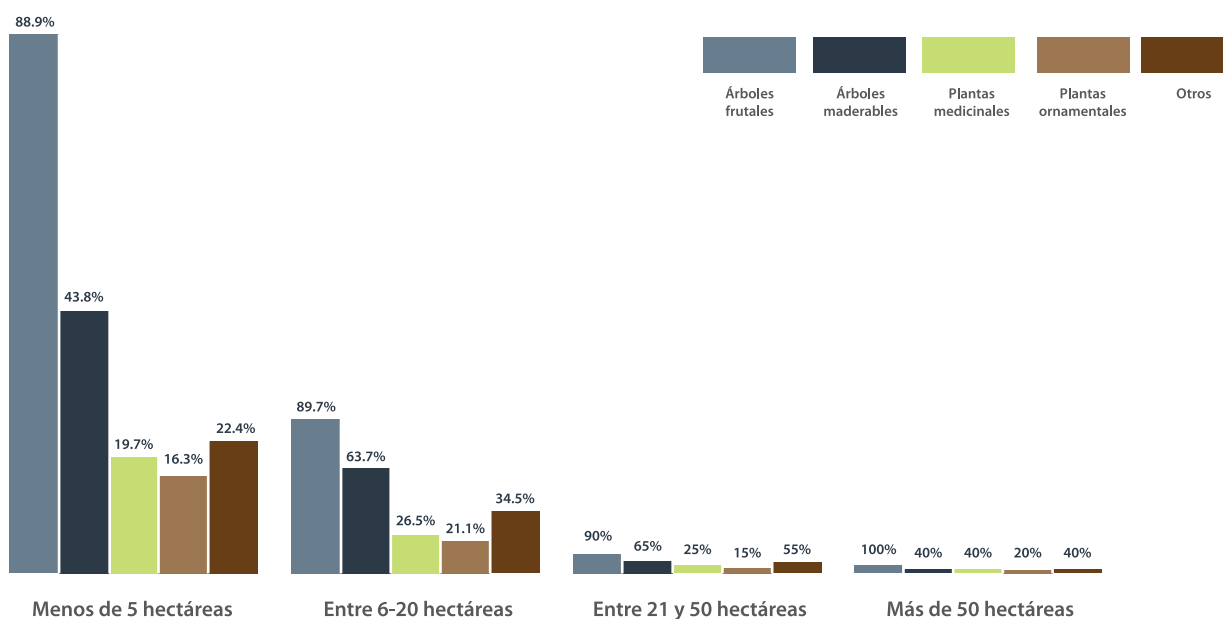


Figura 7 Otros cultivos por tamaño de la explotación agrícola

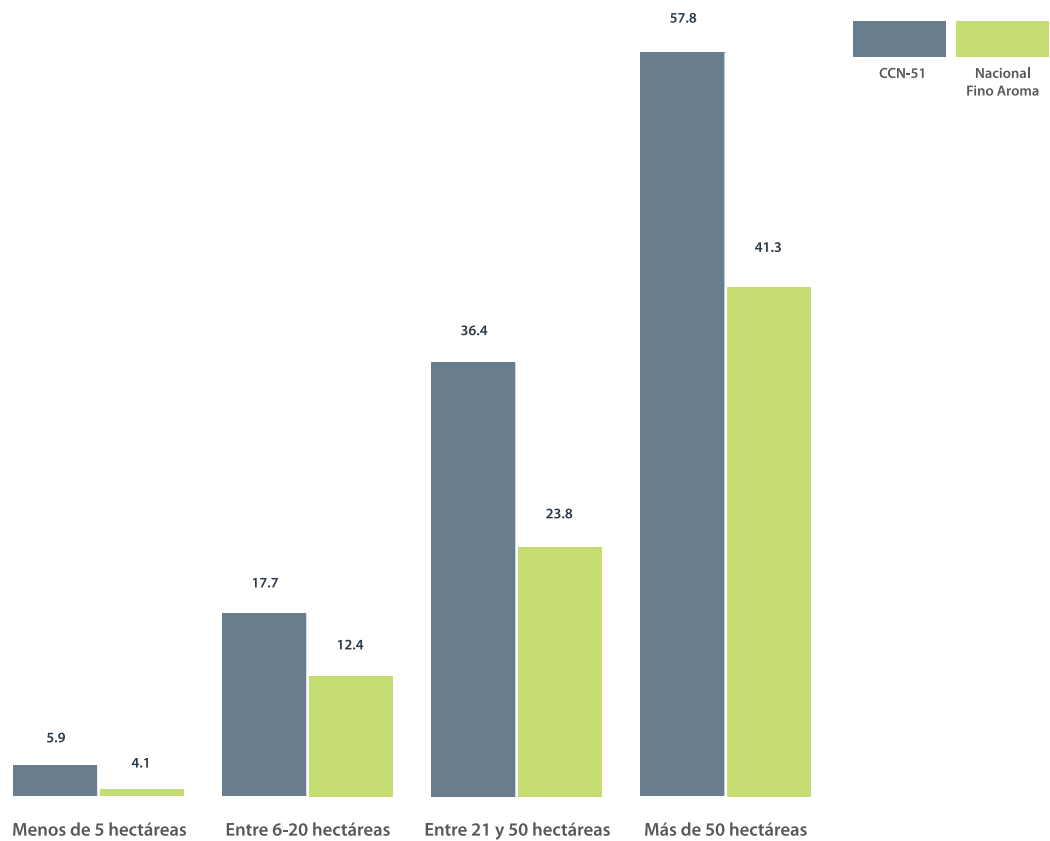


Figura 8 Rendimiento anual por variedad de cacao y tamaño de la finca (1 quintal = 100 kilograms).

El rendimiento promedio por hectárea del CCN-51 fue de 5,9 quintales/año para los pequeños agricultores, 17,1 quintales/año para las parcelas de entre 6-20 hectáreas, 36,4 para las parcelas de entre 21-50 hectáreas y 57,8 para las parcelas de más de 50 hectáreas. Estos resultados revelan que todos los tamaños de finca producen rendimientos considerablemente inferiores, cuando se ajustan por hectárea, en comparación con la media nacional de Ecuador de 0,56 toneladas/hectárea/año (equivalente a 12,64 quintales/año), lo que sugiere algunas dificultades en la productividad como ineficiencias en el manejo de las fincas, factores ambientales adversos o acceso limitado a los recursos (Figura 8).

Si bien casi todos los pequeños agricultores participaban en el cultivo y la cosecha del cacao (99,7%), solo 54,5% declaró dedicarse a actividades posteriores a la cosecha, como son la fermentación y el secado (Figura 9). Los entrevistados atribuyeron los precios récord del cacao en el mercado internacional—que aumentaron en promedio un 145% entre enero y diciembre de 2024—como la principal razón por la cual un mayor número de agricultores optó por vender sus granos húmedos sin procesar directamente a los intermediarios. En el caso del subgrupo de

agricultores que mantuvieron el control sobre las etapas posteriores a la cosecha, se observaron notables modificaciones en las técnicas de procesamiento. Por ejemplo, se redujo la duración de la fermentación o se aceleraron los procesos de secado utilizando hornos eléctricos comunitarios. Estas adaptaciones sugieren una priorización del procesamiento y la venta rápida, impulsada por el deseo de los agricultores de obtener un pago más rápido y evitar las tareas posteriores a la cosecha, que requieren mucha mano de obra.

“El pago inmediato de Val01 es muy apreciado por los agricultores, ya que les proporciona liquidez unas dos semanas antes de la comercialización de los granos, lo que les permite pagar la mano de obra en la finca y otros gastos asociados.” (Val01)

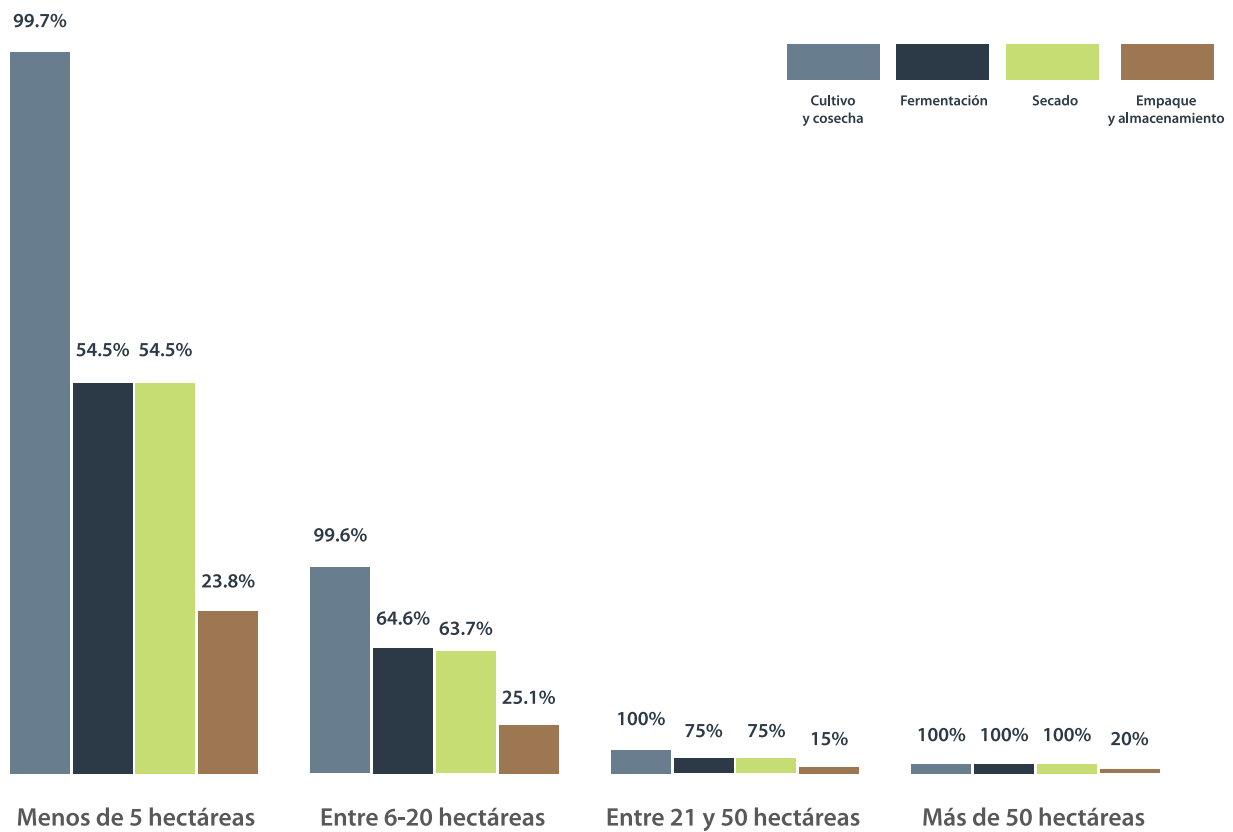


Figura 9 Etapas de la cadena de valor del cacao controladas por pequeños agricultores

6.4.2 Manejo de residuos de subproductos del cacao

Mazorcas de cacao

Los resultados de la encuesta indican que el 91,5% del total de los productores de cacao encuestados dejaron las mazorcas de cacao y su placenta para que se descompongan en el suelo. Solo el 1,2% informó que las transformaba en biocarbón y el 1% que las utilizaba como alimento para los animales en sus fincas. Otro 1,8% de los agricultores informó que vendía las mazorcas de cacao a terceros, que en última instancia también podrían reutilizarlas como alimento para los animales (Figura 15). Como se mencionó en secciones anteriores, aquí se demuestra el uso de las mazorcas de cacao como alimento para los animales, ya que son ricas en fibra, energía y minerales (ej., potasio y fósforo), beneficiosos para la salud digestiva, el metabolismo y el crecimiento de los animales [89]. Los datos cualitativos de las entrevistas también revelaron que los productores de cacao habían experimentado con otras aplicaciones novedosas, como la transformación de las mazorcas en té de cacao, bioplásticos e incluso biocombustible a partir de mazorcas enfermas.

“Con las mazorcas enfermas, que se pierden en las plantaciones y pueden ser miles, logramos generar, por ejemplo, biocombustibles. [...] En ciertas regiones del país, logramos tener [...] algunos vehículos que se desplazaban con el biocombustible generado a partir de las mazorcas de cacao.” (Exp04)

Por último, las grandes multinacionales, especialmente aquellas que mantienen una relación directa con los agricultores, expresaron repetidamente durante las entrevistas que no veían la necesidad de valorizar las mazorcas de cacao, salvo en un futuro como fertilizante orgánico.

“En el campo, (los residuos postcosecha del cacao) terminan como abono. Hasta ahora no se ha realizado ningún (análisis), no vemos necesario valorizarlos, ya que se integran en el suelo como materia orgánica.” (Man04)

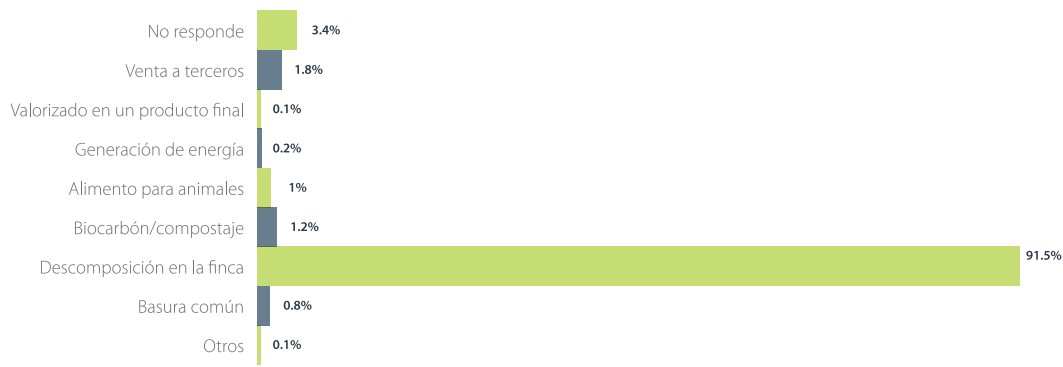


Figura 10 Eliminación de las mazorcas de cacao

Pulpa de cacao

En cuanto a la pulpa de cacao, la mayoría de los agricultores (84,6%) la utilizaban para la fermentación, mientras que un porcentaje menor la desechara como basura (7,1%), la utilizaba para

abono (0,6%), alimento para animales (0,5%), y otros productos con valor agregado (0,4%) (Figura 11).

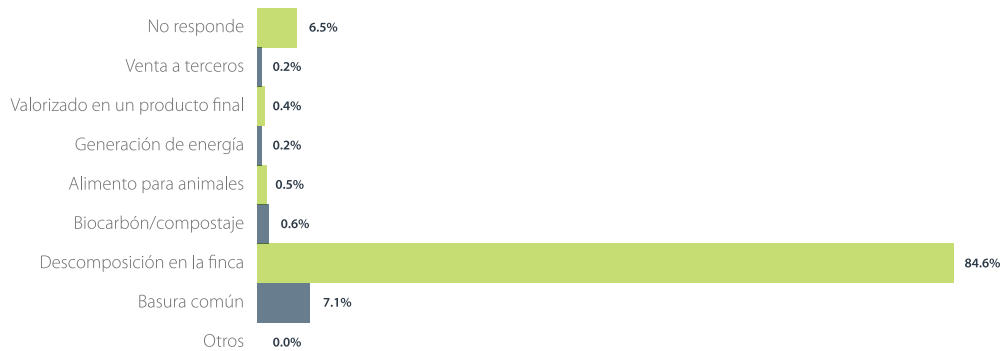


Figura 11 Eliminación de pulpa/mucílago de cacao

Las aplicaciones actuales, según informaron los entrevistados, incluyen: pulpa de cacao congelada y jugo de pulpa de cacao exprimido, utilizado en diversas bebidas (ej., jugos, refrescos carbonatados y cócteles), postres (ej., helados), y bebidas alcohólicas como ginebras y vinos. Las empresas de procesamiento de pulpa entrevistadas también revelaron los múltiples retos técnicos, económicos y normativos asociados a la valorización de la pulpa de cacao. Entre ellos:

- **Consideración 1:** Variabilidad en la composición de la pulpa en función del cultivo y los factores ambientales (ej., contenido de azúcar, ácido y agua). Las variedades de granos de cacao difieren significativamente en sus propiedades físicas y químicas, lo que influye no solo en los procesos de fermentación, sino también en los perfiles de sabor y su idoneidad para diversos productos. Las investigaciones muestran, por ejemplo, que los

granos de cacao CCN-51 contienen más mucílago y presentan un menor contenido de azúcar y acidez total, en comparación con los granos de cacao Nacional y otros clones [90], [91]. Además, factores ambientales como la temporada de cosecha también desempeñan un papel importante en la calidad y la composición de la pulpa del cacao. Por lo tanto, los granos cosechados en las estaciones lluviosas presentan, según se informa, un mayor contenido de agua (83–86%) y ácidos grasos (ej., C16:0, C18:1), aunque menos complejidad aromática, en comparación con los granos cosechados en las estaciones secas [92]. Esto sugiere que, aunque las temporadas lluviosas, que se agravarán en el futuro debido al cambio climático, podrían producir un mayor volumen de pulpa, los niveles más altos de humedad pueden acelerar su deterioro, lo que requiere un método de secado que consuma mucha energía o un procesamiento rápido para estabilizar la pulpa.

La reducción de los compuestos aromáticos también limita el valor de la pulpa para aplicaciones de sabor premium. Por último, existe evidencia de que una variabilidad en la temperatura del suelo (ej., suelos microclimáticos) podría estar relacionada con distintos perfiles de azúcar y acidez en la pulpa [93]. En Ecuador, por

ejemplo, las variedades Nacional de provincias costeras como Manabí muestran un mayor contenido de ácido cítrico (0,3-1,3%), debido a un clima más cálido, en comparación con la Nacional amazónica, que desarrolla aromas más diversos bajo condiciones húmedas y a la sombra [94].

Tabla 6 Principales diferencias entre la pulpa del cacao CCN-51 y Nacional

Factor	CCN-51	Nacional	Implicaciones para el procesamiento de la pulpa
Mucílago	5,3%	3,5%	Un mayor contenido de mucílago aumenta el rendimiento y la viscosidad de la pulpa, lo que puede afectar la eficiencia del prensado, el filtrado y la concentración. Puede ser necesaria la estandarización para garantizar una textura de pulpa uniforme y un rendimiento de procesamiento óptimo.
Acidez	1,6% (bajo)	2,4-2,8% (moderado)	Para estandarizar jugos o mermeladas, es posible que los fabricantes tengan que compensar las diferencias de pH entre los lotes.
Contenido de agua	Una acidez baja puede provocar una menor retención de agua en condiciones comparables	Una acidez elevada puede influir en los efectos osmóticos y provocar una mayor retención de agua en condiciones comparables.	Un alto nivel de humedad (80-90%) acelera el deterioro si no se estabiliza (es decir, se pasteuriza).
Contenido de azúcar	8-15%	10-13% (azúcares reductores más elevados)	Afecta al dulzor y al potencial de fermentación de productos secundarios (ej., bebidas tipo kombucha). Los niveles variables de azúcar de la pulpa de variedades mixtas de cacao requieren equipos flexibles (ej., evaporadores ajustables) para producir concentrados de pulpa uniformes.
Fenoles	169,82 mg GAE/g	157,50 mg GAE/g	Los niveles de fenoles influyen en la actividad antioxidante, el amargor y el color de los productos a base de pulpa. Las condiciones de procesamiento (ej., calentamiento, tratamientos enzimáticos) deben optimizarse para equilibrar los beneficios para la salud con la calidad sensorial.
Perfil aromático	Menos intenso, menos notas florales	Notas complejas, afrutadas/florales.	Los diferentes perfiles aromáticos (notas florales vs. notas frutales) afectan al atractivo sensorial y el posicionamiento en el mercado de jugos, mermeladas o bebidas fermentadas. Se pueden utilizar estrategias de mezcla para lograr perfiles de sabor consistentes y atractivos en todos los lotes.

• **Consideración 2:** Recolección y manejo postcosecha de la pulpa extraída. La calidad de la pulpa de cacao depende en gran medida del grado de madurez de las mazorcas en el momento de la recolección y de la eficiencia del manejo

postcosecha. Las mazorcas poco maduras tienden a producir una pulpa menos azucarada y más ácida, lo que puede afectar negativamente a su idoneidad para productos con valor agregado. Además, los retrasos en el procesamiento de la

pulpa agravan la acumulación de ácido láctico (LA) lo que no solo aumenta la acidez, sino que también acorta significativamente la vida útil de la pulpa. Para hacer frente a estos retos, son esenciales procesos de conservación como la pasteurización. La pasteurización ayuda a estabilizar la pulpa manteniendo su perfil aromático y de sabor, al tiempo que mitiga las fluctuaciones en los niveles de acidez. Estas fluctuaciones suponen un reto importante para los esfuerzos de estandarización, que son fundamentales para garantizar una calidad constante en los productos a base de pulpa de cacao [55], [95].

- **Consideración 3:** Compensaciones de la fermentación. La cantidad de pulpa eliminada para su posterior procesamiento no fue uniforme entre las empresas de procesamiento entrevistadas (variaba entre el 30% y el 90% de eliminación de pulpa). Las investigaciones actuales muestran que una extracción excesiva de pulpa podría alterar la actividad microbiana durante la fermentación, lo que puede disminuir la producción de compuestos aromáticos esenciales y afectar negativamente a las cualidades aromáticas del chocolate y otros productos derivados del cacao.

- **Consideración 4:** Inversión de capital en maquinaria especializada y personal capacitado. La extracción y el procesamiento de la pulpa de cacao requieren equipos especializados de alto coste, como unidades de extracción, secadores y pasteurizadores. Sin embargo, las tecnologías de despulpado y procesamiento siguen siendo poco exploradas, a pesar de su importancia para la separación y la valorización. Futuros desarrollos tecnológicos deben promover rendimientos óptimos, minimizar la generación de residuos y garantizar el aprovechamiento sin impedimentos de los granos de cacao [55]. Además de los equipos, la mano de obra cualificada es fundamental para mantener la eficiencia y la calidad de las operaciones.

“Extraemos más del 90% de la pulpa. Se puede extraer una cantidad tan elevada de pulpa porque en Ecuador se acepta realizar una fermentación parcial.” (Val03)

- **Consideración 5:** Normas higiénicas estrictas y controles de calidad. Las infecciones fúngicas afectan no solo a las mazorcas de cacao, sino

también a los granos en su interior, lo que puede introducir microorganismos dañinos en el jugo de la pulpa y comprometer la seguridad y la calidad de lotes enteros. Por lo tanto, garantizar que la pulpa esté libre de contaminantes requiere estrictos protocolos y prácticas de higiene.

“Cualquier grano en mal estado, como los afectados por la enfermedad de la mazorca negra, contaminará todo el lote de jugo de pulpa, lo que obligará a la empresa a desecharlo.” (Val01)

“Sin duda, nos enfrentamos a retos. Existen máquinas más grandes que podrían mejorar los procesos, pero se necesitaría una estructura diferente y trabajar a mayor escala para justificar la elevada inversión.” (Val02)

- **Consideración 6:** Conocimiento del mercado. Los productos elaborados con pulpa de cacao son novedosos en todo el mundo y, por lo tanto, sus mercados siguen siendo nichos. Las entrevistas revelaron, por ejemplo, que los fabricantes de chocolate suizos a menudo se resisten a reformular las recetas con pulpa de cacao debido a los altos riesgos percibidos en cuanto a cambios de sabor y aceptación por parte de los clientes. Sin embargo, esto no es la norma, ya que en el mercado suizo ya existen alternativas de chocolate con fruta entera fabricadas con pulpa de cacao como ingrediente. La tabla 6 presenta los principales factores que causan variabilidad en la pulpa de cacao para CCN-51 y Nacional.

“La industria alimentaria es muy conservadora, y las grandes empresas no quieren arriesgarse a cambiar productos, ingredientes o recetas económicamente viables con el fin de tener un impacto positivo en los productores y la salud de los consumidores.” (Val02)

Exudado de cacao

El exudado de cacao es el líquido viscoso que se produce durante las etapas iniciales de la fermentación, cuando el mucílago que rodea los granos de cacao comienza a descomponerse mediante la actividad enzimática. En este caso, los resultados no fueron diferentes en comparación con las mazorcas y la pulpa. Solo el 1,8% de los agricultores encuestados lo valorizaba como producto final, mientras que el 69,4% lo consideraba simplemente un subproducto de la fermentación. Un significativo 24,9% de los agricultores encuestados no respondió a esta pregunta. En consonancia con la bibliografía, la pequeña proporción de agricultores que valorizaba los exudados del cacao lo hacía utilizándolos para la producción de biogás y para preparar sus propios insumos agrícolas, por ejemplo, fertilizantes o herbicidas. Por último, el 100% de los encuestados reportó que no disponía de datos sobre la cantidad de residuos biológicos recogidos en sus fincas.

“Hemos realizado pruebas satisfactorias de producción de biogás a partir de los exudados en tanques GRG. Sin embargo, la falta de capacidad y mano de obra ha impedido su implementación.” (Man03)

6.4.3 Retos asociados a la valorización

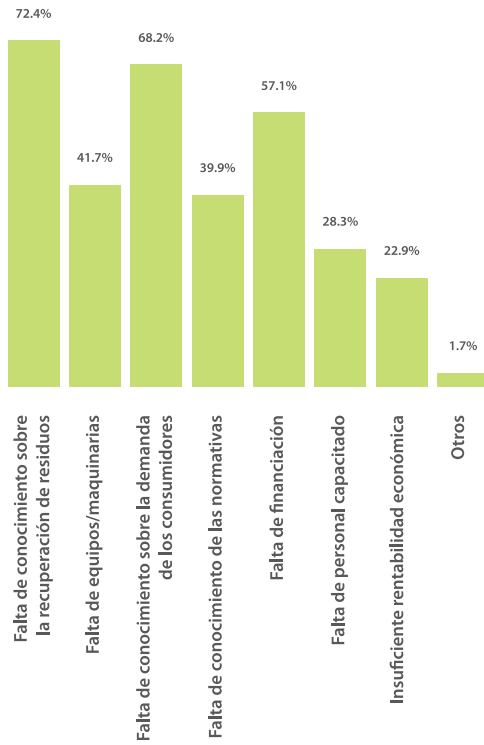
Cuando se les preguntó sobre los retos que perciben en la valorización de los residuos biológicos del cacao, los agricultores mencionaron la falta de conocimientos sobre la valorización de residuos (72,4% en fincas de menos de 5 ha, 61,9% en fincas de entre 6-20 ha, y 85% en fincas de entre 21 y 50 ha), la falta de conocimientos sobre la demanda de los consumidores (58,2%, 75,8% y 75% respectivamente), la falta de financiación (57,1%, 58,3% y 70%), la falta de equipos/maquinaria (41,7%, 51,1% y 55%), y el desconocimiento de la normativa (39,9%, 47,7% y 50%) (ver Figura 12).

Además, en cuanto al atractivo relativo de las diferentes alternativas de valorización, el compost/fertilizante se destacó sistemáticamente como el producto más atractivo en todas las fincas

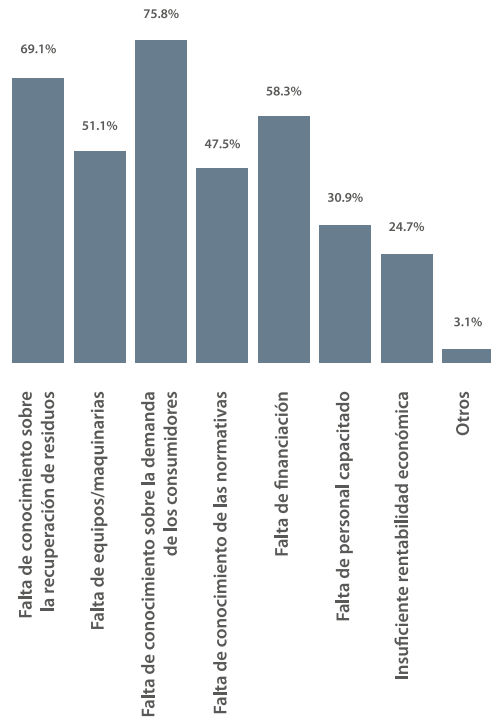
agrícolas, independientemente de su tamaño, con altos porcentajes de «Extremadamente atractivo» y «Muy atractivo». El biogás y los productos alimenticios también obtuvieron una alta valoración, especialmente en las fincas agrícolas de mayor tamaño, lo que indica su utilidad y valor percibidos. Productos como los tintes o pigmentos naturales, los cosméticos y los productos farmacéuticos recibieron calificaciones de atractivo más bajas, lo que sugiere un interés o una aplicabilidad limitados para las fincas más pequeñas. La artesanía, el biocarbón y los envases a base de fibras naturales despertaron un interés moderado, lo que refleja las oportunidades de diversificación potenciales para las fincas de tamaño medio (Figura 13).



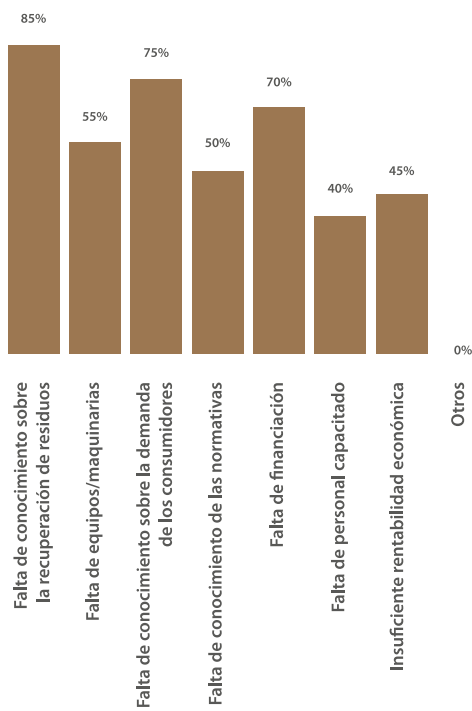
Menos de 5 hectáreas



Entre 6-20 hectáreas



Entre 21-50 hectáreas



Más de 50 hectáreas

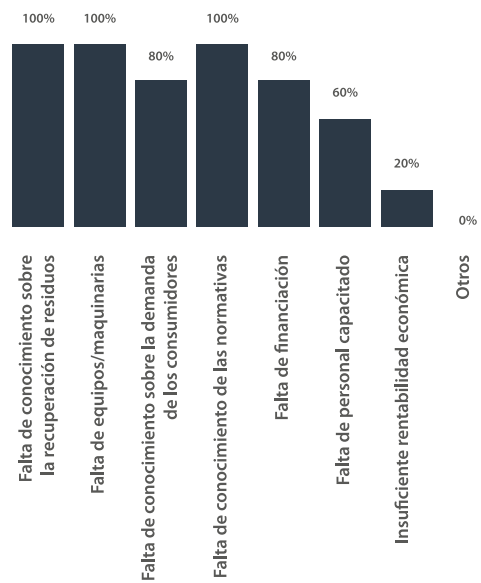


Figura 12 Desafíos de valorización percibidos por tamaño de finca.



Figura 13 Atractivo percibido de diferentes alternativas de valorización según el tamaño de la explotación

6.4.4 Impacto ambiental de los sistemas de productos seleccionados

Como último paso y basándonos en los resultados obtenidos en las secciones anteriores, se realizó una evaluación del ciclo de vida (LCA) intermedia, de acuerdo con las normas ISO 14040/14044, para evaluar tres escenarios de valorización con el objetivo de mejorar la sostenibilidad en la producción de cacao y su procesamiento en productos terminados (para más información sobre la metodología, consulte la sección 6.3).

El análisis mostró que, en comparación con la descomposición al aire libre y la pulpa de cacao deshidratada bajo el método spray dried (Sistema de productos 1 y 3), la producción de biocarbón (Sistema de productos 2) fue la estrategia de valorización con mayor potencial para mejorar el impacto ambiental de la producción de 1 kg de chocolate negro en la mayoría de las categorías de impacto (excepto la formación de partículas finas y

la formación de ozono). La principal fuente de emisiones de GEI en los sistemas de biocarbón suele provenir del proceso de pirólisis, seguido del procesamiento de la materia prima, mientras que el transporte generalmente tiene un impacto menor o insignificante.

En particular, el biocarbón fue efectivo para reducir el impacto del calentamiento global mediante el secuestro de carbono, con un 33,25% del impacto global total. El almacenamiento de carbono en el biocarbón aplicado al suelo es el factor clave. Otras contribuciones al secuestro de carbono incluyen la mejora del rendimiento de los cultivos, la reducción del uso de fertilizantes y la disminución de las emisiones de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O).

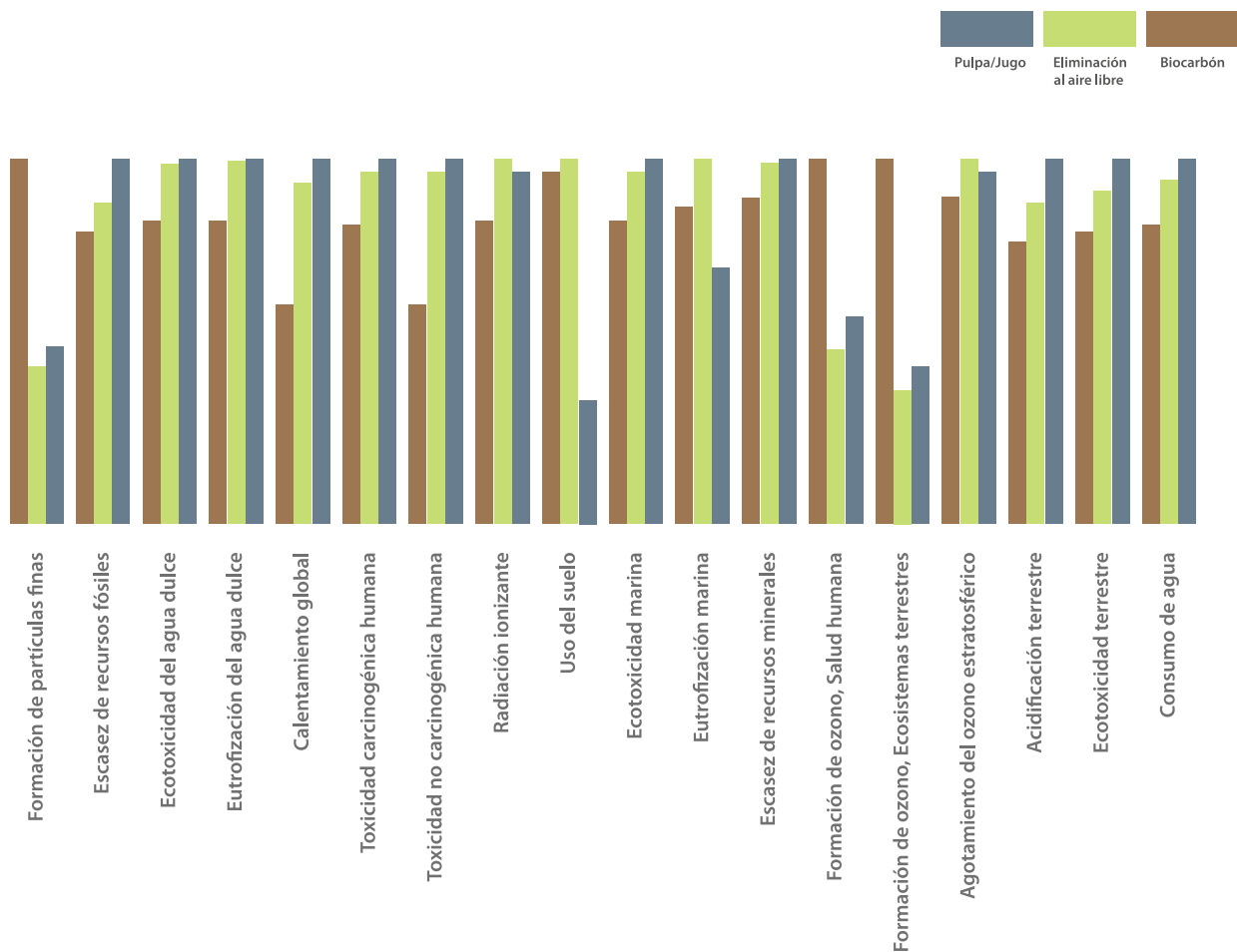


Figura 14 Resultados normalizados en diferentes categorías de impacto ambiental para los sistemas de productos analizados

Además, el análisis de sensibilidad mostró que el aumento del rendimiento de biocarbón y del rendimiento de cacao derivado de su aplicación podría afectar significativamente los resultados generales del impacto ambiental de la unidad funcional evaluada. Sin embargo, actualmente, la adopción generalizada de la producción de biocarbón entre los cacaoteros enfrenta importantes obstáculos debido a la considerable inversión requerida y la incertidumbre en el retorno económico. Si bien las tecnologías avanzadas de pirólisis podrían mitigar los impactos ambientales, sus altos costos y complejidad las hacen inaccesibles para la mayoría de los pequeños productores (Figura 14).

Desde una perspectiva ambiental, el escenario de la pulpa de cacao deshidratada bajo el método spray dried no tuvo un buen desempeño en comparación con los otros dos sistemas de productos especificados anteriormente. La valorización de la pulpa de cacao deshidratada bajo el método spray dried registró el mayor impacto ambiental en la mayoría de las categorías, pero ofrecía ventajas en cuanto al uso del suelo y la eutrofización marina, ya que evitaba la producción de remolacha azucarera y/o caña de azúcar para la elaboración de chocolate. También cabe destacar que el escenario de la pulpa de cacao deshidratada bajo el método spray dried presentaba una mayor incertidumbre en su inventario del ciclo de vida debido a la escasez de estudios comparables. Para comprender mejor el impacto ambiental de la valorización de la pulpa de cacao, futuras investigaciones deberían priorizar la recopilación de datos primarios de empresas que ya implementan estas prácticas.

Por último, se exploró un escenario combinado que incorporaba tanto el biocarbón como la valorización de la pulpa. Al combinar los dos métodos de valorización, este escenario tenía como objetivo maximizar los beneficios ambientales y mitigar algunos de los inconvenientes individuales de cada método (es decir, mantenía los beneficios de secuestro de carbono del biocarbón, lo que reducía significativamente el impacto del calentamiento global, y conservaba las ventajas de la valorización de la pulpa/mucílago en términos de reducción del uso del suelo y del impacto de la eutrofización marina). El enfoque combinado ofrecía a los agricultores la posibilidad de obtener beneficios económicos por la venta de la pulpa de cacao, al tiempo que se beneficiaban de la aplicación del biocarbón.

Futuras investigaciones deberían centrarse en el desarrollo de métodos de producción de biocarbón que sean económicamente viables y tecnológicamente accesibles para pequeños agricultores, la recopilación de más datos primarios sobre los procesos de valorización de pulpa y el análisis de la viabilidad de enfoques combinados de valorización de biocarbón y pulpa, además de aprovechar otras oportunidades circulares a nivel de finca y fábrica. Asimismo, proyectos destinados a educar a los agricultores sobre técnicas de valorización de residuos, abordar las dificultades en el acceso a financiamiento y crear vínculos comerciales para los productos derivados de residuos biológicos podrían impulsar significativamente la bioeconomía circular en el sector cacaotero de Ecuador y fomentar la sostenibilidad en la industria chocolatera de Suiza.



7. Conclusiones y recomendaciones

Al evaluar el estado actual de la producción de cacao y explorar estrategias circulares innovadoras, el informe identifica oportunidades clave para reducir los residuos, mejorar la eficiencia de los recursos y crear cadenas de valor más resilientes. A continuación, se presentan las principales conclusiones del informe.

7.1 Conclusiones

Falta de concienciación y conocimiento entre los agricultores sobre las alternativas de valorización

Como demuestran los resultados de la encuesta, el desarrollo de una industria circular del cacao se enfrenta a un obstáculo crítico: la importante brecha de conocimientos entre los pequeños agricultores sobre el potencial económico y las aplicaciones técnicas de la valorización de los subproductos del cacao. Según se indica en esta investigación, los agricultores encuestados dejan que las mazorcas y los residuos de pulpa se descompongan en el suelo, perdiendo así potenciales valores agregados. Aunque las mazorcas tienen potencial como alimento para animales o biocarbón, su uso sigue siendo limitado. La pulpa de cacao se utiliza principalmente para la fermentación, y solo una pequeña parte se transforma en productos comerciales como bebidas o postres. Los exudados de cacao se utilizan aún menos: solo el 1,8% de los agricultores los convierten en biogás o insumos agrícolas. Estas bajas tasas de valorización no se deben a la falta de interés, sino a la falta de conocimientos, las deficiencias en las infraestructuras y un acceso restringido al financiamiento y los mercados.



La valorización promete beneficios ambientales

El análisis del ciclo de vida (LCA) del estudio demostró que la producción de biocarbón ofrece los mayores beneficios ambientales entre las tres estrategias evaluadas, especialmente a través del secuestro de carbono y la mejora potencial del rendimiento. Sin embargo, sus elevados costes iniciales y su complejidad operativa limitan su adopción por parte de los pequeños agricultores. Por el contrario, la valorización de la pulpa de cacao deshidratada bajo el método spray dried, mostró potencial para reducir la eutrofización terrestre y marina, pero obtuvo resultados menos favorables en otros indicadores ambientales y conllevaba una considerable incertidumbre en los datos. Un escenario de valorización combinada, que integra la aplicación de biocarbón con la utilización de la pulpa, se perfiló como un compromiso prometedor. Este enfoque equilibra los beneficios ambientales del biocarbón con el potencial económico de los productos derivados de la pulpa, ofreciendo una vía circular para el manejo de los residuos del cacao. Los resultados del ACV, especialmente en lo que respecta al procesamiento de la pulpa, deben perfeccionarse para obtener resultados más fiables. Además, deben analizarse otras combinaciones de alternativas de valorización para obtener una visión más realista del impacto ambiental de la valorización.

La valorización de subproductos como medio para mejorar la desigualdad financiera en la industria del cacao

La inestabilidad política y social, el aumento de los costes de mano de obra, los insumos y otros retos relacionados con el clima representan riesgos importantes para los productores de cacao en los países productores. La implementación de una gestión circular eficaz de la biomasa residual del cacao puede ayudar a aumentar y diversificar los ingresos de los agricultores, contribuyendo a mejorar sus medios de vida. Un ejemplo de ello es el biocarbón. La capacidad del biocarbón para secuestrar carbono lo hace apto para los programas de créditos de carbono. Los créditos de carbono se generan cuantificando la cantidad de

CO₂ almacenada de forma permanente en el suelo mediante la aplicación de biocarbón. Estos créditos pueden venderse a organizaciones que deseen compensar sus emisiones, lo que crea una nueva fuente de ingresos para los productores de cacao. Sin embargo, el éxito y la equidad de este enfoque dependerán del desarrollo de modelos de negocio justos, transparentes e inclusivos que den prioridad al bienestar y al empoderamiento de las comunidades productoras de cacao.

Barreras normativas para la valorización

Las empresas que desean valorizar los residuos del cacao mediante su introducción en el mercado de la UE se enfrentan a importantes barreras que abarcan las normativas de seguridad alimentaria, los requisitos para los nuevos alimentos, el cumplimiento de las normas ambientales y los procedimientos de certificación especializados. La barrera normativa más importante para la valorización de los subproductos del cacao es quizás el Reglamento (EU) 2015/2283, sobre nuevos alimentos, que exige una autorización previa a la comercialización para cualquier alimento que no se consumiera en la EU antes del 15 de mayo de 1997. Si bien la pulpa de fruta, el jugo de pulpa y el concentrado de pulpa han sido autorizados como alimentos tradicionales de terceros países, otros subproductos como las cáscaras de cacao procesadas, el biocarbón procedente de residuos de cacao o los compuestos extraídos de las cáscaras de cacao probablemente requerirían evaluaciones individuales en el marco de los nuevos alimentos.

7.2 Recomendaciones

Hacer realidad la visión de una industria circular del cacao exige ir más allá de lo habitual, adoptando no solo una perspectiva interdisciplinaria, sino también transdisciplinaria, en materia de circularidad, sostenibilidad y resiliencia.

También, exige integrar la innovación social, la tecnología de vanguardia, marcos políticos y sistemas de gobernanza sólidos, así como la

participación proactiva de los agricultores en cada paso del proceso. La circularidad en el sector del cacao no es solo una necesidad ambiental, sino una estrategia económica para la prosperidad, la resiliencia y la gestión global en un mundo en rápida evolución. A continuación, se presentan algunas recomendaciones para apoyar la transición circular en la industria del cacao:

Conservación de los compuestos activos y reducción de los contaminantes en los productos de cacao para promover su valorización

Se sabe que los productos de cacao contienen diversas sustancias beneficiosas, como minerales, lípidos, proteínas, carbohidratos, vitaminas, polifenoles, metilxantinas, aminas bioactivas y aromas, que presentan propiedades excepcionales, entre ellas antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas. Para garantizar una aplicación factible de las prácticas circulares en la industria del cacao, las prácticas y tecnologías de producción pueden ayudar a preservar estos compuestos mediante procesos optimizados. Además, la mejora de los métodos de cultivo y procesamiento puede contribuir a la reducción de metales pesados tóxicos presentes en el cacao, como el cadmio (Cd) y el plomo (Pb). De hecho, desde el 01 de enero de 2019, los productos de cacao en la EU deben contener cantidades específicas de cadmio en función del contenido de cacao. En el caso de los subproductos del cacao, las empresas también deben demostrar el cumplimiento de estos límites.

Desarrollo de modelos de negocio circulares, justos e innovadores para la valorización de subproductos del cacao

Si bien la investigación sobre estrategias de bioeconomía circular para transformar los residuos agrícolas en nuevos productos está aumentando, siguen existiendo lagunas notables, especialmente en el desarrollo de modelos de negocio circulares innovadores para la valorización. Creemos que los modelos de negocio circulares justos deben crear una distribución equitativa de los ingresos,

abordando así los desequilibrios de poder fundamentales dentro de la cadena de valor del cacao, donde los fabricantes y minoristas generan entre el 80% y el 90% de los márgenes totales, mientras que los agricultores reciben menos del 7% (es decir, 2 millones de agricultores de cacao viven por debajo de la línea de pobreza) [96].

Integración de tecnologías digitales para la circularidad del cacao

Los sistemas habilitados para el IoT, junto con el aprendizaje automático y los sistemas de trazabilidad digital, pueden impulsar la productividad y la transparencia en la cadena de valor del cacao. Por ejemplo, unos sensores de precisión podrían facilitar los procesos de fermentación, conseguir granos fermentados de alta calidad y separar la pulpa, al tiempo que se reducen los residuos procedentes de fermentaciones fallidas. Estos sistemas pueden ampliarse para supervisar el procesamiento de los subproductos, garantizando una conversión óptima de los residuos del cacao en productos valiosos como biocarbón, productos derivados de la pulpa, etc.

El uso de redes y enfoques transdisciplinarios en el diseño de una industria circular del cacao

El desarrollo de una industria circular del cacao exige cambios fundamentales en la forma en que se llevan a cabo los procesos de investigación, innovación e implementación. Un enfoque transdisciplinario permitirá el desarrollo conjunto de innovaciones sociales, económicas y tecnológicas adaptadas al contexto local, garantizando que las soluciones de economía circular aborden los retos del mundo real en lugar de construcciones teóricas. Los enfoques participativos en la investigación del cacao redefinen fundamentalmente la relación entre investigadores, actores de la industria, gobiernos, inversores y agricultores, transformando a los agricultores de actores pasivos a cocreadores activos de conocimiento y a los actores del mercado de procesadores a agentes de cambio.

8. Referencias

- [1] T. M. W. Mak, X. Xiong, D. C. W. Tsang, I. K. M. Yu, and C. S. Poon, "Sustainable food waste management towards circular bioeconomy: Policy review, limitations and opportunities," *Bioresour. Technol.*, vol. 297, p. 122497, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122497.
- [2] M. Duque-Acevedo, L. J. Belmonte-Ureña, N. Yakovleva, and F. Camacho-Ferre, "Analysis of the Circular Economic Production Models and Their Approach in Agriculture and Agricultural Waste Biomass Management," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 24, p. 9549, Dec. 2020, doi: 10.3390/ijerph17249549.
- [3] M. Scott, "Climate & Chocolate," NOAA Climate.gov. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.climate.gov/news-features/climate-and/climate-chocolate>
- [4] T. A. Lander et al., "Global chocolate supply is limited by low pollination and high temperatures," *Commun. Earth Environ.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, Feb. 2025, doi: 10.1038/s43247-025-02072-z.
- [5] M. Rusconi and A. Conti, "*Theobroma cacao L.*, the Food of the Gods: a scientific approach beyond myths and claims," *Pharmacol. Res.*, vol. 61, no. 1, pp. 5–13, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.phrs.2009.08.008.
- [6] A. M. Gallego et al., "Analysis of fruit ripening in *Theobroma cacao* pod husk based on untargeted metabolomics," *Phytochemistry*, vol. 203, p. 113412, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.phytochem.2022.113412.
- [7] J. Pérez-Flores, J. R. H. Mendoza-Hernández, A. Cleomé, and V. Córdova-Ávalos, Eds., "Cocoa (*Theobroma cacao L.*) harvest and postharvest in Tabasco, Mexico," *Agro Product.*, 2021, doi: 10.22004/ag.econ.315843.
- [8] L. K. Moretti, K. K. Ramos, P. F. Ávila, R. Goldbeck, J. B. Vieira, and P. Efraim, "Influence of cocoa varieties on carbohydrate composition and enzymatic activity of cocoa pulp," *Food Res. Int.*, vol. 173, p. 113393, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.foodres.2023.113393.
- [9] Fernández, R. D. R., Gallo, F. W. M., Cedeño, Á. M. G., Mercedes, M., Galeas, P., Quinteros, H. N. M., Ferrín, L. M. C., Álvarez, A. E. B., & Morante, P. E. N. (2012). Efecto Del Tipo Y Tiempo De Fermentación En La Calidad Física Y Química Del Cacao (*Theobroma cacao L.*) Tipo Nacional. Ciencia y Tecnología.
- [10] C. Erazo Solorzano et al., "Effect of Drying Technique on the Volatile Content of Ecuadorian Bulk and Fine-Flavor Cocoa," *Foods*, vol. 12, no. 5, p. 1065, Mar. 2023, doi: 10.3390/foods12051065.
- [11] B. F. Dzelagha, N. M. Ngwa, and D. Nde Bup, "A Review of Cocoa Drying Technologies and the Effect on Bean Quality Parameters," *Int. J. Food Sci.*, vol. 2020, pp. 1–11, Dec. 2020, doi: 10.1155/2020/8830127.
- [12] D. Lasisi, "A Comparative Study of Effects of Drying Methods on Quality of Cocoa Beans," *Int. J. Eng. Res.*, vol. 3, no. 1, 2014.
- [13] P. Udomkun et al., "Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach," *J. Environ. Manage.*, vol. 268, p. 110730, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110730.
- [14] D. Pérez Neira, "Energy sustainability of Ecuadorian cacao export and its contribution to climate change. A case study through product life cycle assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 2560–2568, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.003.

- [15] E. B. F. Ngatsi, "Effect of sanitary and phytosanitary measures on cocoa exports: does the quality of governance matter?" Oct. 25, 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-3477258/v1.
- [16] B. Urbańska, J. Kowalska, and D. Miarka, "Supply chain and traceability in the processing of cocoa beans," *Zesz. Probl. Postępów Nauk Rol.*, no. 594, pp. 99–111, Sep. 2018, doi: 10.22630/ZPPNR.2018.594.29.
- [17] M. Hinneh et al., "Pod storage with roasting: A tool to diversifying the flavor profiles of dark chocolates produced from 'bulk' cocoa beans? (part I: aroma profiling of chocolates)," *Food Res. Int.*, vol. 119, pp. 84–98, May 2019, doi: 10.1016/j.foodres.2019.01.057.
- [18] B. Z. Hurtado-Soria, E. Villanueva, G. C. Chire-Fajardo, and M. O. Ureña-Peralta, "Optimization of cocoa roasting process using static tray and rotary drum to maximize phenolics content and antioxidant capacity by response surface method," *J. Agric. Food Res.*, vol. 19, p. 101622, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jafr.2024.101622.
- [19] M. Rojas, A. Hommes, H. J. Heeres, and F. Chejne, "Physicochemical Phenomena in the Roasting of Cocoa (*Theobroma cacao* L.)," *Food Eng. Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 509–533, Sep. 2022, doi: 10.1007/s12393-021-09301-z.
- [20] J. Oracz, D. Zyzelewicz, and E. Nebesny, "The Content of Polyphenolic Compounds in Cocoa Beans (*Theobroma cacao* L.), Depending on Variety, Growing Region, and Processing Operations: A Review," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 55, no. 9, pp. 1176–1192, Jul. 2015, doi: 10.1080/10408398.2012.686934.
- [21] R. Indiarito, N. Sukri, and E. Subroto, "The Chocolate Conching Technique and Its Impact on Physicochemical Properties: A Mini-Review," *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.*, vol. 9, no. 6, pp. 785–790, Jun. 2021, doi: 10.30534/ijeter/2021/25962021.
- [22] S. J. Calva-Estrada, M. Utrilla-Vázquez, A. Vallejo-Cardona, D. B. Roblero-Pérez, and E. Lugo-Cervantes, "Thermal properties and volatile compounds profile of commercial dark-chocolates from different genotypes of cocoa beans (*Theobroma cacao* L.) from Latin America," *Food Res. Int.*, vol. 136, p. 109594, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.foodres.2020.109594.
- [23] S. Y. Reddy, N. Full, P. S. Dimick, and G. R. Ziegler, "Tempering method for chocolate containing milk-fat fractions," *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 73, no. 6, pp. 723–727, Jun. 1996, doi: 10.1007/BF02517947.
- [24] A. C. Bunge, R. Mazac, M. Clark, and L. Gordon, "Emerging alternatives to coffee, cocoa and palm oil deserve a spot on the research agenda," *Nat. Food*, vol. 6, no. 1, pp. 2–5, Jan. 2025, doi: 10.1038/s43016-024-01103-w.
- [25] WCP, "A proposed delay to EUDR: What it means for the cocoa sector," World Cocoa Foundation. Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: <https://worldcocoafoundation.org/news-and-resources/article/a-proposed-delay-to-eudr-what-it-means-for-the-cocoa-sector>
- [26] C. Andres, H. Comoé, A. Beerli, M. Schneider, S. Rist, and J. Jacobi, "Cocoa in monoculture and dynamic agroforestry," in *Sustainable Agriculture Reviews*, vol. 19, E. Lichtfouse, Ed., Switzerland: Springer International Publishing, 2016, pp. 121–153. doi: 10.1007/978-3-319-26777-7_3.
- [27] FAO, "Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030." 2002. Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.fao.org/4/y3557s/y3557s11.htm#s>
- [28] R. G. Boakye, D. A. Stanley, and B. White, "Honey contamination from plant protection products approved for cocoa (*Theobroma cacao*) cultivation: A systematic review of existing research and methods," *PLOS ONE*, vol. 18, no. 10, p. e0280175, Oct. 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0280175.

- [29] A. F. Vargas Martínez, J. A. López Cifuentes, and Á. E. Alvarado-Gaona, "Sostenibilidad Ambiental Y Manejo De Residuos En Sistemas De Producción De Cacao En El Suroccidente De Boyacá-Colombia," *Rev. Cienc. Agric.*, vol. 18, no. 3, pp. 47–62, 2021.
- [30] L. Ombelet, L. Lewis, K. Kelly, and A. Gorbushina, "The Hidden Benefits of Cacao Waste | World Resources Institute," World Resources Institute. Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.wri.org/insights/hidden-benefits-cacao-waste>
- [31] S. L. Nordahl, C. V. Preble, T. W. Kirchstetter, and C. D. Scown, "Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from Composting," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 6, pp. 2235–2247, Jan. 2023, doi: 10.1021/acs.est.2c05846.
- [32] F. R. Bianchi, L. Moreschi, M. Gallo, E. Vesce, and A. Del Borghi, "Environmental analysis along the supply chain of dark, milk and white chocolate: a life cycle comparison," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 26, no. 4, pp. 807–821, Apr. 2021, doi: 10.1007/s11367-020-01817-6.
- [33] J. A. Van Vliet, M. A. Slingerland, Y. R. Waarts, and K. E. Giller, "A Living Income for Cocoa Producers in Côte d'Ivoire and Ghana?," *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 5, p. 732831, Oct. 2021, doi: 10.3389/fsufs.2021.732831.
- [34] E. Somarriba et al., "Rehabilitation and renovation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry systems. A review," *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 41, no. 5, p. 64, Oct. 2021, doi: 10.1007/s13593-021-00717-9.
- [35] M. Addaney, J. Ayaribilla Akudugu, and M. O. Asibey, "Changing land tenure regimes and women's access to secure land for cocoa cultivation in rural Ghana." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837722003192>
- [36] R. Campos-Vega, K. H. Nieto-Figueroa, and B. D. Oomah, "Cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk: Renewable source of bioactive compounds," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 81, pp. 172–184, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.tifs.2018.09.022.
- [37] Z. S. Vásquez et al., "Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review," *Waste Manag.*, vol. 90, pp. 72–83, May 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.04.030.
- [38] D. C. Meza-Sepúlveda, A. M. Castro, A. Zamora, J. W. Arboleda, A. M. Gallego, and A. V. Camargo-Rodríguez, "Bio-Based Value Chains Potential in the Management of Cocoa Pod Waste in Colombia, a Case Study," *Agronomy*, vol. 11, no. 4, p. 693, Apr. 2021, doi: 10.3390/agronomy11040693.
- [39] F. Lu et al., "Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 14, pp. 80–88, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.cogsc.2018.07.007.
- [40] J. A. Van Vliet and K. E. Giller, "Mineral Nutrition of Cocoa," in *Advances in Agronomy*, vol. 141, Elsevier, 2017, pp. 185–270. doi: 10.1016/bs.agron.2016.10.017.
- [41] F. Picchioni et al., "Valorisation of Natural Resources and the Need for Economic and Sustainability Assessment: The Case of Cocoa Pod Husk in Indonesia," *Sustainability*, vol. 12, no. 21, p. 8962, Oct. 2020, doi: 10.3390/su12218962.
- [42] I. Rahim, A. Nasruddin, T. Kuswinanti, L. Asrul, and B. Rasyid, "Utilization of Cocoa Pod Husk Waste Composting by *Tremella* Sp and *Pleurotus* Sp as A Medium to Growth of Cocoa Seedling," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 156, p. 012012, May 2018, doi: 10.1088/1755-1315/156/1/012012.
- [43] J. Makinde, S. A. Okunade, E. Opoola, A. B. Sikiru, S. O. Ajide, and S. Elaigwu, "Exploration of Cocoa (*Theobroma cacao*) By-Products as Valuable Potential Resources in Livestock Feeds and Feeding Systems,"

in *Theobroma cacao* - Deploying Science for Sustainability of Global Cocoa Economy, P. Osobase Aikpokpodion, Ed., IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.87871.

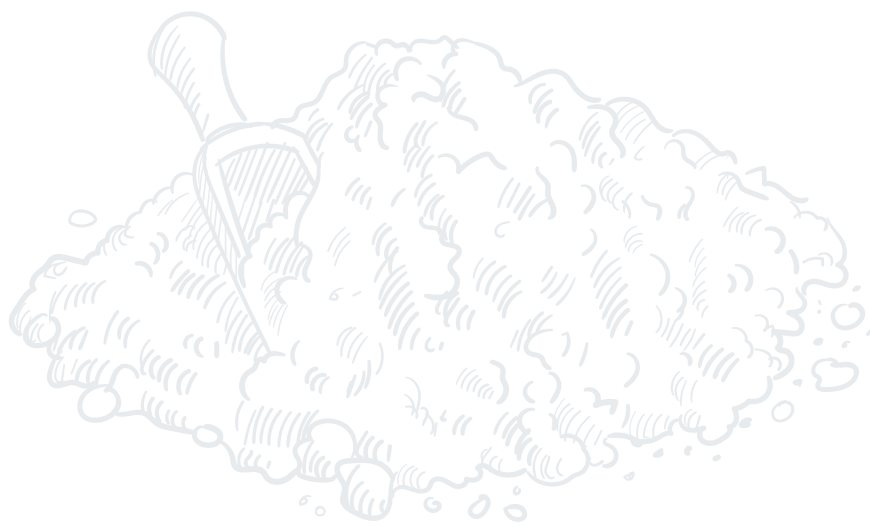
- [44] E. Muñoz, G. Curaqueo, M. Cea, L. Vera, and R. Navia, "Environmental hotspots in the life cycle of a biochar-soil system," *J. Clean. Prod.*, vol. 158, pp. 1–7, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.163.
- [45] C.-H. Tsai, W.-T. Tsai, S.-C. Liu, and Y.-Q. Lin, "Thermochemical characterization of biochar from cocoa pod husk prepared at low pyrolysis temperature," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 8, no. 2, pp. 237–243, Jun. 2018, doi: 10.1007/s13399-017-0259-5.
- [46] C. Y. B. Abbey, A. B. Duwiejuah, and A. K. Quianoo, "Removal of toxic metals from aqueous phase using cacao pod husk biochar in the era of green chemistry," *Appl. Water Sci.*, vol. 13, no. 2, p. 57, Feb. 2023, doi: 10.1007/s13201-022-01863-5.
- [47] J. O. Eduah, E. K. Nartey, M. K. Abekoe, S. W. Henriksen, and M. N. Andersen, "Mechanism of orthophosphate (PO₄-P) adsorption onto different biochars," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 17, p. 100572, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.eti.2019.100572.
- [48] G. Cruz, "Production of Activated Carbon from Cocoa (*Theobroma cacao*) Pod Husk," *J. Civ. Environ. Eng.*, vol. 02, no. 02, 2012, doi: 10.4172/2165-784X.1000109.
- [49] K. S. Chun, S. Husseinsyah, and H. Osman, "Development of Biocomposites from Cocoa Pod Husk and Polypropylene: Effect of Filler Content and 3-Aminopropyltriethoxysilane," *Polym. Renew. Resour.*, vol. 5, no. 4, pp. 139–156, Nov. 2014, doi: 10.1177/204124791400500401.
- [50] N. Thi Thanh Viet et al., "Research on building a biochar production model from agricultural by-products in Gia Lai province," *J. For. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 003–010, Nov. 2024, doi: 10.55250/Jo.vnuf.9.2.2024.003-010.
- [51] V. T. Nguyen and N. H. Nguyen, "Proximate Composition, Extraction, and Purification of Theobromine from Cacao Pod Husk (*Theobroma cacao* L.)," *Technologies*, vol. 5, no. 2, p. 14, Apr. 2017, doi: 10.3390/technologies5020014.
- [52] J. Matuščík, T. Hnátková, and V. Kočí, "Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 259, p. 120998, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120998.
- [53] T. Bickel Haase, U. Schweiggert-Weisz, E. Ortner, H. Zorn, and S. Naumann, "Aroma Properties of Cocoa Fruit Pulp from Different Origins," *Molecules*, vol. 26, no. 24, p. 7618, Dec. 2021, doi: 10.3390/molecules26247618.
- [54] C. Balladares et al., "Physicochemical characterization of *Theobroma cacao* L. mucilage, in Ecuadorian coast," *Emir. J. Food Agric.*, vol. 28, no. 10, p. 741, 2016, doi: 10.9755/ejfa.2016-02-187.
- [55] T. Bickel Haase, S. Naumann-Gola, E. Ortner, H. Zorn, and U. Schweiggert-Weisz, "Thermal stabilisation of cocoa fruit pulp — Effects on sensory properties, colour and microbiological stability," *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 7, p. 100549, 2023, doi: 10.1016/j.crfs.2023.100549.
- [56] E. M. Castro-Alayo, G. Idrogo-Vásquez, R. Siche, and F. P. Cardenas-Toro, "Formation of aromatic compounds precursors during fermentation of Criollo and Forastero cocoa," *Heliyon*, vol. 5, no. 1, p. e01157, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01157.
- [57] R. F. Schwan and A. E. Wheals, "The Microbiology of Cocoa Fermentation and its Role in Chocolate Quality," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 44, no. 4, pp. 205–221, Jul. 2004, doi: 10.1080/10408690490464104.

- [58] V. Klis, E. Pühn, J. J. Jerschow, M. A. Fraatz, and H. Zorn, "Fermentation of Cocoa (*Theobroma cacao* L.) Pulp by *Laetiporus persicinus* Yields a Novel Beverage with Tropical Aroma," *Fermentation*, vol. 9, no. 6, p. 533, May 2023, doi: 10.3390/fermentation9060533.
- [59] E. Meersman et al., "Detailed Analysis of the Microbial Population in Malaysian Spontaneous Cocoa Pulp Fermentations Reveals a Core and Variable Microbiota," *PLoS ONE*, vol. 8, no. 12, p. e81559, Dec. 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0081559.
- [60] C. S. O. Nunes et al., "Potential Applicability of Cocoa Pulp (*Theobroma cacao* L) as an Adjunct for Beer Production," *Sci. World J.*, vol. 2020, pp. 1–14, Sep. 2020, doi: 10.1155/2020/3192585.
- [61] R. Rodríguez-Castro, R. Guerrero, A. Valero, J. Franco-Rodríguez, and G. Posada-Izquierdo, "Cocoa Mucilage as a Novel Ingredient in Innovative Kombucha Fermentation," *Foods*, vol. 13, no. 11, p. 1636, May 2024, doi: 10.3390/foods13111636.
- [62] A. Q. Chong, S. W. Lau, N. L. Chin, R. A. Talib, and R. K. Basha, "Fermented Beverage Benefits: A Comprehensive Review and Comparison of Kombucha and Kefir Microbiome," *Microorganisms*, vol. 11, no. 5, p. 1344, May 2023, doi: 10.3390/microorganisms11051344.
- [63] "New cacaofruit gelato mix | Cabosse Naturals." Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.barry-callebaut.com/en/manufacturers/cacaofruit/trends-insights/new-cacaofruit-gelato>
- [64] "Happy Co Pulpa de Cacao - Toma los beneficios del cacao - Ecuador," Happy Co Pulpa de Cacao - Ecuador. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://hco.ec/>
- [65] R. Gardner, "Cacao Pulp: It's Not Just a Waste Product of Cocoa Anymore," *Nutritional Outlook*. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.nutritionaloutlook.com/view/cacao-pulp-its-not-just-waste-product-cocoa-anymore>
- [66] Koa Switzerland AG, "Products - Tasty, natural, and impactful," Koa. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://koa-impact.com/products/>
- [67] V. Endrayani, R. D. Ludescher, R. Di, and M. V. Karwe, "Total Phenolics and Antioxidant Capacity of Cocoa Pulp: Processing and Storage Study: COCOA PULP PHENOLICS AND ANTIOXIDANT CAPACITY," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 41, no. 4, p. e13029, Aug. 2017, doi: 10.1111/jfpp.13029.
- [68] T. F. Soares and M. B. P. P. Oliveira, "Cocoa By-Products: Characterization of Bioactive Compounds and Beneficial Health Effects," *Molecules*, vol. 27, no. 5, p. 1625, Mar. 2022, doi: 10.3390/molecules27051625.
- [69] C. P. Guirlanda, G. G. Da Silva, and J. A. Takahashi, "Cocoa honey: Agro-industrial waste or underutilized cocoa by-product?," *Future Foods*, vol. 4, p. 100061, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.fufo.2021.100061.
- [70] N. Meneses-Marentes, S. M. Bharath, and H. Hopfer, "Effect of the addition of cocoa sweatings and time of fermentation on flavor compounds and sensory perception of 100% roasted cocoa liquor," *J. Food Sci.*, vol. 89, no. 11, pp. 7294–7308, Nov. 2024, doi: 10.1111/1750-3841.17404.
- [71] O. Rojo-Poveda, L. Barbosa-Pereira, G. Zeppa, and C. Stévigny, "Cocoa Bean Shell—A By-Product with Nutritional Properties and Biofunctional Potential," *Nutrients*, vol. 12, no. 4, p. 1123, Apr. 2020, doi: 10.3390/nu12041123.
- [72] A. Quiceno Suarez, C.-C. EM, C.-V. HJ, and A.-T. JC, "By-products of the cocoa agribusiness: high value added materials based on their bromatological and chemical characterization," *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, vol. 77, no. 1, pp. 10585–10599, Jan. 2024, doi: 10.15446/rfnam.v77n1.107738.

- [73] R. Indiarto, Z. R. Raihan, M. P. Dewi, Z. R. Aqila, and M. Y. Efendi, "A Review of Innovation in Cocoa Bean Processing By-Products," *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.*, vol. 9, no. 8, pp. 1162–1169, Aug. 2021, doi: 10.30534/ijeter/2021/22982021.
- [74] J. V. Villarroel-Bastidas, G. D. C. Angulo-Ortega, and J. Briones-Bitar, "Degradación de azúcares reductores del mucílago de cacao para la producción de bioetanol," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, Sep. 2022, doi: 10.17533/udea.redin.20220992.
- [75] F. Valdez, "El cacao fino de aroma, el cacao ancestral emblemático del Ecuador," in *Patrimonios alimentarios en América Latina: Recursos locales, actores y globalización*, N. Rebaï, A.-G. Bilhaut, C.-É. De Suremain, E. Katz, and M. Paredes, Eds., in *D'Amérique latine.*, Marseille: IRD Éditions, 2021, pp. 135–159. doi: 10.4000/books.irdeditions.43132.
- [76] S. Zarrillo et al., "The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon," *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 2, no. 12, pp. 1879–1888, Oct. 2018, doi: 10.1038/s41559-018-0697-x.
- [77] A. Acosta, *Breve historia económica del Ecuador*, 2da edición. Quito: Corporación Editora Nacional, 2006. Accessed: Mar. 16, 2022. [Online]. Available: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/111157-opac>
- [78] OEC, "Cocoa Beans (HS: 1801) Product Trade, Exporters and Importers," *The Observatory of Economic Complexity*. Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: <https://oec.world/en/profile/hs/cocoa-beans>
- [79] A. Villacis, J. Alwang, and V. Barrera, "Cacao value chains and credence attributes: lessons from Ecuador," *J. Agribus. Dev. Emerg. Econ.*, vol. 12, no. 4, pp. 549–566, Jan. 2022, doi: 10.1108/JADEE-10-2021-0267.
- [80] A. R. García-Briones, B. F. Pico-Pico, R. Jaimez, A. R. García-Briones, B. F. Pico-Pico, and R. Jaimez, "La cadena de producción del Cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción," *Rev. Digit. Novasinerгия*, vol. 4, no. 2, pp. 152–172, Nov. 2021, doi: 10.37135/ns.01.08.10.
- [81] F. M. Intriago, M. C. Zenteno, J. F. Neto, M. P. Galeas, W. B. Caicedo, and M. A. Moyano, "Cadena de comercialización del cacao nacional en la provincia de Los Ríos, Ecuador," *Cienc. Tecnol.*, vol. 11, no. 1, Art. no. 1, Jul. 2018, doi: 10.18779/cyt.v11i1.222.
- [82] N. Lupton, A. Sanchez-Riofrio, and A. Kerpel, "Pacari Chocolate: preserving biodiversity, living without regret," *Emerald Emerg. Mark. Case Stud.*, vol. 8, pp. 1–34, Feb. 2018, doi: 10.1108/EEMCS-06-2017-0127.
- [83] A. Villacis, V. Barrera, J. Alwang, C. Caicedo, and J. Quiroz, "Strategies to Strengthen Ecuador's Alta-Value Cacao Value Chain," Jan. 2022, doi: 10.18235/0003960.
- [84] CBI, "The Swiss market potential for cocoa," CBI Ministry of Foreign Affairs. Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.cbi.eu/market-information/cocoa-cocoa-products/switzerland/market-potential>
- [85] CBI, "The European market potential for speciality cocoa," CBI Ministry of Foreign Affairs. Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.cbi.eu/market-information/cocoa-cocoa-products/speciality-cocoa/market-potential>
- [86] Chocosuisse, "Facts & figures," Services. Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.chocosuisse.ch/en/services/facts-figures>

- [87] M. Guilcapi, "Análisis del estado actual de las cadenas de café y cacao. Producto 2: cacao." 2018. [Online]. Available: https://procurement-notice.undp.org/view_file.cfm?doc_id=186105
- [88] A. Charry et al., "The bittersweet economics of different cacao production systems in Colombia, Ecuador and Peru," *Agric. Syst.*, vol. 224, p. 104235, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.agsy.2024.104235.
- [89] M. I. Anya, P. O. Ozung, and P. A. Igwe, "Blood profile of West African Dwarf (WAD) bucks fed raw and processed cocoa pod husk meal based – diets in the humid high rainforest zone of Nigeria," *Glob. J. Pure Appl. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 125–135, Dec. 2018, doi: 10.4314/gjpas.v24i2.1.
- [90] R. K. Kalloo, L. A. Motilal, G. S. H. Baccus-Taylor, and P. Umaharan, "A Preliminary Investigation Into The Effect Of Variety On The Chemical Composition Of Cacao (*Theobroma cacao L.*) Pulp," in *Proceedings of the International Symposium on Cocoa Research*, 2017. [Online]. Available: <https://www.icco.org/wp-content/uploads/T5.12.A-PRELIMINARY-INVESTIGATION-INTO-THE-EFFECT-OF-VARIETY-ON-THE-CHEMICAL-COMPOSITION-OF-CACAO-THEOBROMA-CACAO-L.-PULP.pdf>
- [91] M. Orbe Chamorroayra, L.-A. Manosalvas-Quiroz, N. Pinto Mosquera, and I. Samaniego, "Effect of fermentation parameters on the antioxidant activity of Ecuadorian cocoa (*Theobroma cacao L.*)," *AIMS Agric. Food*, vol. 9, no. 3, Art. no. agrfood-09-03-047, 2024, doi: 10.3934/agrfood.2024047.
- [92] A. Chumthong et al., "Effect of Harvest Season on the Physical Properties, Fatty Acid Composition, and Volatile Compounds of Roasted Cacao Beans," *Makara J. Sci.*, vol. 28, no. 1, Mar. 2024, doi: 10.7454/mss.v28i1.2187.
- [93] S. Llano et al., "Exploring the Impact of Fermentation Time and Climate on Quality of Cocoa Bean-Derived Chocolate: Sensorial Profile and Volatilome Analysis," *Foods*, vol. 13, no. 16, p. 2614, Aug. 2024, doi: 10.3390/foods13162614.
- [94] T. Bickel Haase, U. Schweiggert-Weisz, E. Ortner, H. Zorn, and S. Naumann, "Aroma Properties of Cocoa Fruit Pulp from Different Origins," *Molecules*, vol. 26, no. 24, p. 7618, Dec. 2021, doi: 10.3390/molecules26247618.
- [95] B. T. A. Koelher, S. M. M. De Souza, A. M. Da Costa, and E. Aguiar-Oliveira, "Applicability of *Saccharomyces cerevisiae* Strains for the Production of Fruit Wines Using Cocoa Honey Complemented with Cocoa Pulp," *Food Technol. Biotechnol.*, vol. 60, no. 2, pp. 192–201, Jun. 2022, doi: 10.17113/ftb.60.02.22.7285.
- [96] S. Bermudez, V. Voora, C. Larrea, and E. Luna, "Global Market Report: Cocoa prices and sustainability. Sustainable Commodities Marketplace Series." International Institute for Sustainable Development, 2022. [Online]. Available: <https://www.iisd.org/system/files/2022-11/2022-global-market-report-cocoa.pdf>
- [97] A. H. Dinh and A. Q. Hoang, "An updated review on chemical compositions of cocoa products and by-products with a focus on toxic elements and organic pollutants," *Food Chem.*, vol. 489, p. 145001, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.foodchem.2025.145001.
- [98] N. Yuliana, G. W. Sari, E. L. Widiastuti, S. Suharyono, and T. Setiawan, "The Sensory of Kombucha Cacao Pulp (*Theobroma cacao*) Fermented Using Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast (SCOBY) as a Starter," *Int. Conf. Agric. Nutraceutical Food Sci. ICANFS 2022*, vol. 1, no. 0, Art. no. 0, 2022.
- [99] S. A. Villarreal-Soto, S. Beaufort, J. Bouajila, J.-P. Souchard, and P. Taillandier, "Understanding Kombucha Tea Fermentation: A Review," *J. Food Sci.*, vol. 83, no. 3, pp. 580–588, Mar. 2018, doi: 10.1111/1750-3841.14068.

- [100] B. C. T. Bourrie, B. P. Willing, and P. D. Cotter, "Frontiers | The Microbiota and Health Promoting Characteristics of the Fermented Beverage Kefir", doi: 10.3389/fmicb.2016.00647.
- [101] R. F. Schwan and A. E. Wheals, "The microbiology of cocoa fermentation and its role in chocolate quality," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 44, no. 4, pp. 205–221, 2004, doi: 10.1080/10408690490464104.
- [102] S. J. Crozier and W. J. Hurst, "Chapter 83 - Cocoa Polyphenols and Cardiovascular Health," in *Polyphenols in Human Health and Disease*, R. R. Watson, V. R. Preedy, and S. Zibadi, Eds., San Diego: Academic Press, 2014, pp. 1077–1085. doi: 10.1016/B978-0-12-398456-2.00083-9.
- [103] J.-E. Kim et al., "Oral Supplementation with Cocoa Extract Reduces UVB-Induced Wrinkles in Hairless Mouse Skin," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 136, no. 5, pp. 1012–1021, May 2016, doi: 10.1016/j.jid.2015.11.032.
- [104] K. A. Cooper, J. L. Donovan, A. L. Waterhouse, and G. Williamson, "Cocoa and health: a decade of research | *British Journal of Nutrition*," *Camb. Core*, doi: 10.1017/S0007114507795296.
- [105] A. Sharkova and I. Sycheva, "Pricing of the commodity market on the example of an integrated model of the economy of the cocoa industry," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Mar. 2021, p. 10033. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124410033>.
- [106] "Top Cocoa Bean Producers Worldwide, 2019 - Document - Gale Business: Insights." Accessed: Mar. 01, 2024. [Online]. Available: https://go-gale-com.libezproxy2.syr.edu/ps/retrieve.do?tabID=MarketShareRankings&resultListType=RESULT_LIST&searchResultsType=SingleTab&retrievalId=b1b07fa6-1713-4356-884b-f38957dce184&hitCount=177&searchType=BasicSearchForm¤tPosition=21&docId=GALE%7CI2502075204&docType=Market+share+report&sort=Pub+Date+Reverse+Chron&contentSegment=GBIB&prodId=GBIB&pageNum=2&contentSet=GALE%7CI2502075204&searchId=R6&userGroupName=nysl_ce_syr&inPS=true







El apoyo financiero para esta investigación fue otorgado por la Leading House for the Latin American Region de la Universidad de St. Gallen, que opera bajo el auspicio de la Secretaría de Estado de Educación, Investigación e Innovación (SERI) de Suiza. Esta financiación se asigna a través del programa Research Partnership Grant, en virtud del acuerdo de subvención No. RPG2345.