

**INFORME DE INVESTIGACIÓN DEL PROYECTO SENNOVA SGPS 10554
“EVALUACIÓN DE LA ECOEFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DEL BAGAZO DE CACAO PELETIZADO,
COMO PROPUESTA DE ALTERNATIVA ENERGÉTICA EN SANTANDER”**

Presentado por: Abdiana Yurley Quintero Guerrero, Instructora red de conocimiento ambiental

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE
Centro de Atención al Sector Agropecuario
Piedecuesta, 21 de Diciembre de 2023



Esta obra está bajo una Licencia [Creative Commons AtribuciónNoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Evaluación de la Ecoeficiencia de Combustión del Bagazo de Cacao Peletizado, Como Propuesta de Alternativa Energética en Santander

Informe de Investigación - Vigencia 2023

Resumen Ejecutivo

La creciente preocupación por el calentamiento global y las emisiones de CO₂ ha impulsado la búsqueda de fuentes de energía sostenibles. Aunque la biomasa se presenta como una alternativa, su baja densidad energética plantea desafíos, especialmente en el caso de residuos de cacao. La falta de investigación sobre pellets derivados de biomásas residuales limita la comprensión de su potencial energético. A nivel nacional, la dependencia de combustibles fósiles es del 75.7%, destacando la necesidad de incrementar las fuentes renovables. Santander, principal productor de cacao, enfrenta desafíos relacionados con el manejo ineficiente de residuos, lo que subraya la importancia de investigaciones que impulsen la competitividad en este sector.

Este informe presenta los resultados de la investigación realizada del proyecto SENNOVA SGPS 10554, logrando de acuerdo con los objetivos trazados, determinar el potencial energético del bagazo de cacao, elaborar pellets, analizar estructuralmente los pellets y proponer un esquema tecnológico para la conversión del bagazo en biocombustible. Para su desarrollo, se llevaron a cabo actividades de secado natural y forzado a fin de evaluar la pérdida de humedad y los tiempos requeridos para dicho proceso. Se realizó el cálculo del poder calorífico teórico y experimental mediante los análisis elemental, próximo y estructural de las biomásas y bomba calorimétrica.

Las muestras de bagazo de cacao empleadas corresponden a dos variedades representativas de la región cacaotera, específicamente del municipio de San Vicente de Chucurí. La primera variedad, Cacao San Vicente 155 Criolla, destacada por su amplia producción en la región. La segunda variedad, FSV-1, proveniente de la finca San Luis en San Vicente de Chucurí, la cual ha obtenido reconocimientos internacionales por su rendimiento y atributos de sabor, aroma, textura y calidad. En los procesos de secado forzado, se observó que las muestras alcanzaron humedades comprendidas entre el 8% y el 15%. Se evidenció que un menor tamaño de partícula y niveles de humedad del 10% y 15% favorecieron la peletización, aunque fue necesario emplear aglomerantes para mejorar la compactación. En cuanto al poder calorífico, se determinó un promedio de 19,73 Mj/kg (PCS) y 18,88 Mj/kg (PCI) para el bagazo CRIOLLO, mientras que para el bagazo FSV-1 se registró un promedio de 20,15 Mj/kg (PCS) y 19,22 Mj/kg (PCI).

Este estudio aborda lagunas críticas en la investigación sobre el aprovechamiento del bagazo de cacao como fuente de energía, proporcionando datos valiosos para el desarrollo sostenible en el sector cacaotero de Santander y ofreciendo perspectivas sobre la viabilidad de los pellets derivados de biomásas residuales como una opción energética prometedora.

Introducción

La creciente preocupación global por el calentamiento global ha generado colaboraciones entre la industria y la academia para reducir las emisiones de CO₂, principalmente derivadas del uso de recursos fósiles en la producción de energía (Sui et al., 2018). En 2019, el 81.7% de la demanda mundial de energía provino de fuentes fósiles, agravando las emisiones de gases de efecto invernadero y afectando el medio ambiente (Martínez-Guido et al., 2019). Este agotamiento ambiental ha impulsado la búsqueda de fuentes alternativas, destacando el interés actual en la biomasa renovable como materia prima para la energía sostenible (García et al., 2019).

A pesar del potencial de la biomasa, su baja densidad energética representa un desafío significativo, impactando los costos de transporte y almacenamiento (Martínez-Guido et al., 2019). Los pellets surgen como una solución prometedora al proporcionar mayor densidad y facilitar la manipulación de la biomasa, especialmente en sistemas como las calderas de lecho fijo ampliamente utilizadas en Colombia (Barrera Hernández et al., 2018). Sin embargo, la investigación sobre el potencial energético de los pellets, especialmente los derivados de biomasa residual de cacao, sigue siendo limitada, predominando la evaluación del bagazo crudo (Syamsiro et al., 2012).

A nivel nacional, la dependencia de combustibles fósiles es del 75.7%, mientras que las energías renovables apenas representan el 19.15%, con solo el 0.04% correspondiente a biomasa residual (Unidad de Planeación Minero Energética, 2021). En Santander, principal productor de cacao a nivel nacional, se enfrentan desafíos relacionados con el manejo ineficiente de los residuos de cacao, constituyendo el 80% de la fruta desechada como biomasa residual. La falta de avances tecnológicos en el manejo post-cosecha genera preocupaciones ambientales y sociales, afectando económicamente a los agricultores y subrayando la importancia de investigaciones para impulsar la competitividad en este sector (Vásquez et al., 2019; Pabón, 2016).

Esta investigación surge de la necesidad crítica de encontrar soluciones innovadoras para el aprovechamiento energético del bagazo de cacao en Santander. A pesar de reconocer la baja densidad energética como un desafío, la sugerencia de utilizar pellets se presenta como una estrategia prometedora. Aunque no se llegó a la etapa de combustión y evaluación de la ecoeficiencia, la investigación generó conocimientos valiosos, como la determinación del poder calorífico de la biomasa y la influencia de variables como tamaño de partícula y humedad en sus propiedades energéticas. Además, se logró determinar la humedad apropiada para la elaboración de pellets y sus componentes estructurales, información crucial para el esquema tecnológico propuesto.

En concordancia con el plan tecnológico del CASA (2020-2030), la investigación se articula con la línea de Biorrefinerías Integradas. La propuesta del esquema tecnológico para la conversión del bagazo de cacao en biocombustible y la evaluación financiera cumplen integralmente con la iniciativa de I+D+I “Valorización de residuos agropecuarios a través de biorrefinerías sostenibles”. El impacto potencial en Santander, como principal productor de cacao, destaca la importancia estratégica de esta investigación para la región, centrada en la integración de energías renovables a partir del aprovechamiento de biomasa residual agrícola.

La investigación se posiciona como precursora en la implementación de tecnologías innovadoras y sostenibles en el contexto agrícola de Santander, alineándose con los principios del desarrollo sostenible y ofreciendo un enfoque práctico y aplicado para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la producción de cacao. Este enfoque integral respalda la visión del CASA y proyecta la región como líder en la adopción de prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente y económicamente viables.

Metodología

Obtención de las Muestras.

Para la obtención de las muestras de bagazo de cacao, se llevó a cabo la selección de dos variedades representativas de la región cacaotera, específicamente del municipio de San Vicente de Chucurí, reconocido como el primer productor de cacao a nivel nacional. La primera variedad elegida fue la Cacao San Vicente 155 Criolla, caracterizada por ser la de mayor producción en el municipio. La elección de esta variedad se fundamenta en su relevancia dentro del contexto local y su amplia

presencia en la región. La segunda variedad seleccionada fue la FSV-1, proveniente de la finca San Luis en San Vicente de Chucurí. Esta variedad ha obtenido reconocimientos internacionales en dos ocasiones debido a su destacado rendimiento en producción, así como por sus atributos de sabor, aroma, textura y calidad. Ambas variedades fueron elegidas con el propósito de garantizar la representatividad de la biomasa residual de cacao en la investigación, considerando tanto la producción cuantitativa como la calidad reconocida a nivel internacional.

Construcción de las Curvas de Secado y Humedad del Bagazo Previo a su Peletización.

Con el propósito de obtener valores precisos de humedad en el bagazo de cacao, se realizaron diversas subactividades siguiendo los lineamientos técnicos de las normas ASTM E871 - 82, ASTM E1757 y E1756. Inicialmente, se registró la masa inicial de las muestras seleccionadas y la masa del bagazo extraído por muestra. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de secado natural de los residuos, permitiendo que la biomasa perdiera humedad de manera espontánea. Durante este proceso, se realizó un seguimiento mediante gravimetría discontinua para cuantificar la pérdida de masa y calcular el contenido de humedad en diferentes momentos. A partir de estos datos, se construyó una curva de secado natural que representa la relación entre el tiempo y la humedad durante este proceso.

Luego, se procedió al secado forzado de los residuos en una mufla a 105 °C con intervalos de 3 horas, acelerando la eliminación de humedad. Se realizó un seguimiento adicional mediante gravimetría discontinua para cuantificar la pérdida de masa durante el secado forzado y medir la humedad resultante. La información recopilada en este proceso permitió la construcción de una curva de secado forzado que representa la relación entre el tiempo y la humedad en esta fase. Una vez realizadas estas actividades se seleccionaron dos niveles de humedad con base en el ratio consumo energético/tiempo -obtenido de las curvas de humedad del proceso de secado forzado- y los rangos reportados de humedad apropiados para la peletización del bagazo de cacao (10% al 15%).

Cálculo del Poder Calorífico Teórico y Experimental del Bagazo Recibido y Particulado.

En esta etapa, se procedió a la caracterización del bagazo de cacao a través del análisis elemental, el análisis próximo y el análisis estructural. El análisis elemental proporcionó datos sobre el porcentaje en peso de carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno en los residuos. Simultáneamente, el análisis próximo reveló los porcentajes de volátiles, cenizas y carbono fijo, mientras que el análisis estructural estableció los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa presentes en la biomasa residual.

A partir de estos datos, se procedió al cálculo analítico del poder calorífico inferior (PCI) y superior (PCS) de los residuos utilizando las fórmulas de Dulong. Estos valores teóricos fueron comparados con las mediciones experimentales obtenidas mediante la bomba calorimétrica. Las sub actividades realizadas en esta etapa incluye la trituración de los residuos de bagazo para facilitar los procesos posteriores y la realización de operaciones de tamizado para seleccionar dos tamaños de grano (250 micras - 500 micras) como variables independientes en el estudio. La selección del tamaño de partícula se basa en investigaciones previas sobre diversas biomasa residuales y forestales. Estas investigaciones sugieren que tamaños de partícula inferiores a 1 mm están asociados con un aumento en el poder calorífico de la biomasa.

Preparación de los Pellets.

La preparación de pellets se llevó a cabo considerando varios factores cruciales para la calidad y eficiencia del biocombustible resultante. Inicialmente, se exploró la posibilidad de aumentar la ecoeficiencia del proceso al no añadir aglutinante, teniendo en cuenta los rangos de humedad apropiados para la peletización (10% - 15%) y que la introducción de dicho componente implica una etapa adicional de secado de los pellets, lo cual incrementa el consumo energético global del proceso. Sin embargo, se corroboró que la relación 70/30 %p/p proporciona la compactación más efectiva de la biomasa residual (bagazo de cacao) empleando almidón como aglomerante. Se elaboraron tamaños de pellets entre 10 y 5 mm (5 mm, 7 mm y 10 mm). Esta elección se basó en la optimización para procesos de combustión tipo batch. Las sub actividades desarrolladas en esta fase incluyen:

- Cálculo de la relación másica del bagazo peletizado sobre el recibido.
- Análisis estructural de los pellets.
- Envío de las muestras para su análisis elemental, próximo y PCS mediante bomba calorimétrica

Planteamiento del Esquema Tecnológico Para la Conversión del Bagazo de Cacao en Biocombustible.

A la fecha sólo el 0.04% de la energía generada a partir de procesos de combustión en Colombia corresponde al uso de biomasa residual (Unidad de Planeación Minero Energética, 2021). Dicha tecnología puede considerarse relativamente nueva pero con grandes perspectivas, especialmente para Santander, teniendo en cuenta que es la región que presenta la mayor producción de cacao (28037 toneladas/mes) y por lo tanto, alta cantidad de estos residuos. A partir de los resultados obtenidos de la investigación se realiza el esquema para la transformación del bagazo de cacao en biocombustible tipo pellet, planteando los procesos, actividades y tecnologías necesarias para su implementación.

Análisis Costo - Beneficio del Aprovechamiento del Bagazo de Cacao Como Biocombustible de uso en la Cadena de Valor Energética Industrial.

Como parte fundamental de la investigación, se cuantifican los costos asociados al procesamiento de la biomasa residual de cacao en biocombustible sólido, y los beneficios económicos obtenidos por la venta del producto final a la cadena energética industrial.

Promoción del aprovechamiento del bagazo de cacao como biocombustible.

Como actividad final del proyecto de investigación, se realiza la transferencia tecnológica participando del V Encuentro de semillas clasificatorio a Infomatrix Sudamérica Colombia 2024, promovido por el Centro Industrial y del Desarrollo Tecnológico SENA, en Barrancabermeja - Santander, mediante el "XI Version Redes Unidas para el Conocimiento".

Diseño Experimental

El presente estudio implementó un diseño factorial estándar con las siguientes variables y niveles: humedad en dos niveles, tamaño de grano del bagazo en dos niveles y diámetro de los pellets en tres niveles (Tabla 1). Como resultado de su reproducibilidad, el total de experimentos a realizar

corresponderá a un total de 12 -producto de la combinación 2 * 2 * 3- para cada variedad.

Tabla 1.

Diseño experimental.

Variable	Niveles
Humedad (% p/p)	Alto
	Bajo
Tamaño de partícula (micras)	Alto
	Bajo
Tamaño de pellet (mm)	Alto
	Medio
	Bajo

Nota: Elaboración del autor

Resultados

Construcción de las Curvas de Secado y Humedad del Bagazo Previo a su Peletización.

Registro de la masa inicial de las muestras seleccionadas. Para la ejecución del proyecto se seleccionaron dos variedades de cacao, extraídas de tres fincas del municipio de San Vicente de Chucurí. Como bien se conoce, San Vicente de Chucurí es la capital cacaotera del departamento de Santander, este municipio se destaca dentro del panorama nacional como el primer productor de cacao (8000 ton/año). Por tanto, para la obtención de las muestras de biomasa residual de cacao, se optó por traer mazorcas representativas de esta región. La primera variedad seleccionada fue la Cacao San Vicente 155 Criolla, siendo ésta la de mayor producción en el municipio. La segunda variedad seleccionada fue la FSV-1, ésta variedad ha sido traída de la finca San Luis también de San Vicente de Chucurí, la cual ha recibido en dos ocasiones premios internacionales por rendimiento en producción, sabor, aroma, textura y calidad.

A continuación se presentan los datos de masa inicial obtenida de las mazorcas seleccionadas: El procesamiento de las muestras de bagazo da inicio el 15 de mayo de 2023 para el primer lote, y el 23 de mayo de 2023 para el segundo lote, obteniéndose los siguientes pesos iniciales:

Tabla 2.

Masa inicial lote 1 de bagazo variedad Cacao Criollo

Variedad Cacao Criollo				
Item	Fecha	D	M	A
	Hora	15	5	2023
	7:00			
Lote 1/Muestras	Peso (Kg)			
1	0,650			

2	0,575
3	0,495
4	0,610
5	0,705
6	0,680
7	0,715
8	0,670
9	0,580
10	0,655
11	0,505
12	0,540
Promedio	0,615

Nota: Elaboración del autor

Tabla 3.

Masa inicial lote 2 bagazo variedad Cacao Criollo y FSV-1

Pesaje Inicial					
Lote 2/Muestras	Fecha	D	M	A	Promedio
	Hora	23	5	2023	
	11:00				
	Peso (Kg)				
1 - Variedad FSV-1	4,855				0,607
2 - Variedad Criolla	5,385				0,673

Nota: Elaboración del autor

Registro de la masa del bagazo extraído por muestra. Una vez pesadas las mazorcas de cada variedad, se procede a abrirlas y extraer el fruto, obteniéndose las siguientes masas de bagazo:

Tabla 4.

Masa extraída lote 1 bagazo variedad Cacao Criollo

MASAS DEL BAGAZO				
LOTE 1/Muestras	FECHA	D	M	A
	HORA	15	5	2023
	8:00			
	PESO (kg)	% PERDIDO		
1	0,380	41,54		
2	0,310	46,09		
3	0,290	41,41		
4	0,405	33,61		
5	0,400	43,26		
6	0,385	43,38		
7	0,455	36,36		
8	0,410	38,81		
9	0,365	37,07		
10	0,405	38,17		
11	0,280	44,55		
12	0,310	42,59		
Promedio	0,366	40,57		

Nota: Elaboración del autor

Tabla 5.

Masa extraída lote 2 bagazo variedad Cacao Criollo y FSV-1

MASAS DEL BAGAZO					
Lote 2/Muestras	Fecha	D	M	A	Promedios (Kg)
	Hora	23	5	2023	
	12:00				
	Peso (Kg)	% Perdido			
1 - Variedad FSV-1	3,070	36,77			0,384
2 - Variedad Criolla	4,015	25,44			0,502

Nota: Elaboración del autor

Como se puede observar la variedad FSV-1, presentó menor peso en comparación con la variedad Criolla, pero a diferencia de ésta, la variedad FSV-1 presentó mayor masa extraída en fruto (36,74%), y menor masa para su aprovechamiento como biomasa residual (63,26%). La variedad Criolla presentó menor masa extraída como fruto (25,40%) y mayor masa para su aprovechamiento como biomasa residual (74,60%).

Secado natural de la biomasa residual (Bagazo). una vez extraído el fruto, se procede a colocar las cáscaras de bagazo de cacao a la intemperie sobre un plástico negro y en el techo de la planta de chocolatería fina del centro de formación. Se prosiguió de acuerdo a los lineamientos técnicos establecidos en la ASTM E1757, método de prueba A adecuado para cantidades de biomasa grandes (>20 g). La materia prima de biomasa se distribuye sobre la superficie para su secado al aire natural. El material no se amontona sino que se distribuye de tal manera que queden las cáscaras totalmente expuestas a la intemperie. En adelante el material se gira al menos diariamente para garantizar un secado uniforme y minimizar el moldeado de material que puede contener cantidades significativas de humedad. El material se considera seco cuando la variación de peso es inferior al 1 % en 24 horas.

Seguimiento con gravimetría discontinua y cálculo de contenido de humedad. Se realiza seguimiento a las cáscaras de cacao expuestas a la intemperie mediante gravimetría.

Lote 1: Para el primer lote se determina practicar volteos cada 2 Horas y pesaje de las muestras cada 6 Horas durante el día. A partir del sexto día se realiza seguimiento con gravimetría cada 12 horas.

Tabla 6.

Pérdida de peso en secado natural de bagazos lote 1 variedad Cacao Criollo

MUESTRA	HORA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA
	8:30	14:30	1	20:30	1	6:30	2	12:30	2
	PESO (kg)	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO
1	0,380	0,300	21,05	0,315	-5,00	0,305	3,17	0,280	8,20
2	0,310	0,250	19,35	0,245	2,00	0,250	-2,04	0,200	20,00
3	0,290	0,230	20,69	0,215	6,52	0,230	-6,98	0,215	6,52
4	0,405	0,345	14,81	0,345	0,00	0,325	5,80	0,300	7,69
5	0,400	0,330	17,50	0,325	1,52	0,340	-4,62	0,290	14,71
6	0,385	0,275	28,57	0,255	7,27	0,275	-7,84	0,220	20,00
7	0,455	0,380	16,48	0,380	0,00	0,385	-1,32	0,305	20,78
8	0,410	0,350	14,63	0,350	0,00	0,365	-4,29	0,290	20,55
9	0,365	0,300	17,81	0,285	5,00	0,300	-5,26	0,255	15,00
10	0,405	0,315	22,22	0,320	-1,59	0,315	1,56	0,265	15,87
11	0,280	0,225	19,64	0,225	0,00	0,230	-2,22	0,185	19,57

12	0,310	0,265	14,52	0,255	3,77	0,270	-5,88	0,210	22,22
----	-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------

HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA
6:30	3	12:30	3	18:30	3	6:30	4	12:30	4
PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO
0,255	8,93	0,200	21,57	0,175	12,50	0,175	0,00	0,126	28,00
0,215	-7,50	0,155	27,91	0,150	3,23	0,130	13,33	0,090	30,77
0,195	9,30	0,140	28,21	0,160	-14,29	0,115	28,13	0,100	13,04
0,290	3,33	0,225	22,41	0,215	4,44	0,190	11,63	0,140	26,32
0,270	6,90	0,205	24,07	0,190	7,32	0,175	7,89	0,125	28,57
0,205	6,82	0,145	29,27	0,140	3,45	0,125	10,71	0,080	36,00
0,320	-4,92	0,240	25,00	0,235	2,08	0,210	10,64	0,165	21,43
0,285	1,72	0,230	19,30	0,220	4,35	0,210	4,55	0,125	40,48
0,240	5,88	0,215	10,42	0,170	20,93	0,155	8,82	0,110	29,03
0,240	9,43	0,205	14,58	0,170	17,07	0,155	8,82	0,090	41,94
0,200	-8,11	0,155	22,50	0,120	22,58	0,115	4,17	0,060	47,83
0,200	4,76	0,155	22,50	0,135	12,90	0,125	7,41	0,080	36,00

HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA
6:30	5	12:30	5	18:30	5	6:30	6	18:30	6
PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO
0,135	-12,50	0,085	37,04	0,095	-11,76	0,090	5,26	0,080	11,11
0,095	0,00	0,075	21,05	0,100	-33,33	0,110	-10,00	0,080	27,27
0,085	0,00	0,060	29,41	0,070	-16,67	0,075	-7,14	0,060	20,00
0,130	7,14	0,100	23,08	0,120	-20,00	0,125	-4,17	0,105	16,00
0,110	8,33	0,080	27,27	0,090	-12,50	0,095	-5,56	0,080	15,79
0,095	-18,75	0,055	42,11	0,090	-63,64	0,090	0,00	0,070	22,22
0,145	0,00	0,100	31,03	0,115	-15,00	0,115	0,00	0,095	17,39
0,145	-7,41	0,100	31,03	0,125	-25,00	0,135	-8,00	0,105	22,22
0,105	0,00	0,070	33,33	0,095	-35,71	0,100	-5,26	0,080	20,00
0,105	-5,00	0,075	28,57	0,115	-53,33	0,125	-8,70	0,095	24,00
0,080	-6,67	0,050	37,50	0,075	-50,00	0,090	-20,00	0,070	22,22

0,065	18,75	0,055	15,38	0,105	-90,91	0,115	-9,52	0,090	21,74
-------	-------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------

HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA
6:30	7	18:30	7	6:30	8	18:30	8	6:30	9	18:30	9
PESO (kg)	% PERDID O	PESO (kg)	% PERDID O	PESO (kg)	% PERDID O	PESO (kg)	% PERDID O	PESO (kg)	% PERDID O	PESO (kg)	% PERDID O
0,075	6,25	0,075	0,00	0,075	0,00	0,075	0,00	0,080	-6,67	0,070	12,50
0,075	6,25	0,075	0,00	0,075	0,00	0,075	0,00	0,080	-6,67	0,070	12,50
0,060	0,00	0,060	0,00	0,065	-8,33	0,060	7,69	0,060	0,00	0,060	0,00
0,095	9,52	0,085	10,53	0,085	0,00	0,080	5,88	0,090	-12,50	0,075	16,67
0,075	6,25	0,070	6,67	0,075	-7,14	0,075	0,00	0,080	-6,67	0,070	12,50
0,065	7,14	0,060	7,69	0,060	0,00	0,060	0,00	0,065	-8,33	0,060	7,69
0,095	0,00	0,090	5,26	0,085	5,56	0,080	5,88	0,080	0,00	0,080	0,00
0,095	9,52	0,090	5,26	0,085	5,56	0,080	5,88	0,095	-18,75	0,075	21,05
0,075	6,25	0,075	0,00	0,075	0,00	0,075	0,00	0,080	-6,67	0,075	6,25
0,085	10,53	0,080	5,88	0,080	0,00	0,075	6,25	0,080	-6,67	0,070	12,50
0,060	14,29	0,060	0,00	0,060	0,00	0,055	8,33	0,050	9,09	0,050	0,00
0,080	11,11	0,075	6,25	0,070	6,67	0,070	0,00	0,060	14,29	0,070	-16,67

HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA
6:30	10	18:30	10	6:30	11	18:30	11	6:30	12
PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO
0,070	0,00	0,065	7,14	0,065	0,00	0,065	0,00	0,065	0,00
0,070	0,00	0,066	5,71	0,066	0,00	0,066	0,00	0,066	0,00
0,060	0,00	0,053	11,67	0,053	0,00	0,053	0,00	0,053	0,00
0,070	6,67	0,067	4,29	0,067	0,00	0,067	0,00	0,067	0,00
0,070	0,00	0,063	10,00	0,063	0,00	0,063	0,00	0,063	0,00
0,060	0,00	0,053	11,67	0,053	0,00	0,053	0,00	0,053	0,00
0,085	-6,25	0,074	12,94	0,074	0,00	0,074	0,00	0,074	0,00
0,075	0,00	0,070	6,67	0,070	0,00	0,070	0,00	0,070	0,00
0,075	0,00	0,064	14,67	0,064	0,00	0,064	0,00	0,064	0,00
0,080	-14,29	0,071	11,25	0,071	0,00	0,071	0,00	0,071	0,00

0,060	-20,00	0,050	16,67	0,050	0,00	0,050	0,00	0,050	0,00
0,070	0,00	0,060	14,29	0,060	0,00	0,060	0,00	0,060	0,00

Nota: Elaboración del autor

Lote 2: Para el segundo lote se opta por practicar volteos cada 6 horas y pesaje cada 24 horas, obteniéndose así los siguientes registros de pesos y porcentaje de pérdida de humedad:

Tabla 7.

Pérdida de peso en secado natural de bagazos lote 2 variedad Cacao Criollo y FSV-1

MUESTRA	HORA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA
	12:00	12:00	1	12:00	2	12:00	3	12:00	4
	PESO (kg)	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO
FSV-1	3,070	2,655	13,52	2,120	20,15	1,645	22,41	1,365	17,02
Criollo	4,015	3,370	16,06	2,800	16,91	2,260	19,29	1,970	12,83

HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA	HORA	DIA
12:00	5	12:00	6	12:00	7	12:00	8	12:00	9
PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO
1,092	20,00	0,900	17,58	0,825	8,33	0,720	12,73	0,610	15,28
1,655	15,99	1,340	19,03	1,100	17,91	0,845	23,18	0,775	8,28

HORA	DIA	HORA	DIA
12:00	10	12:00	11
PESO (kg)	% PERDIDO	PESO (kg)	% PERDIDO
0,610	0,00	0,610	0,00
0,700	9,68	0,700	0,00

Nota: Elaboración del autor

De acuerdo con los resultados de secado natural obtenidos, se realiza la determinación de los porcentajes de humedad analizando los datos hasta el día en que las muestras presentaron variación de pesos inferior al 1 % en 24 horas:

Tabla 8.

Porcentaje de humedad alcanzada secado natural lote 1 variedad Cacao Criollo

Muestra	Días	% Humedad alcanzado
1	8	20

2	8	24
3	8	21
4	9	21
5	8	19
6	9	16
7	10	18
8	9	21
9	8	21
10	9	20
11	8	21
12	10	19
PROMEDIOS	9	20,08

Nota: Elaboración del autor

Como se puede observar del lote 1, la mayoría de las muestras dejaron de perder peso luego de 10 días de secado a la intemperie. De este proceso, la humedad más baja obtenida del secado natural fue de 16% y la más alta obtenida fue de 24%.

Tabla 9.

Porcentaje de humedad alcanzada lote 2 variedad Cacao Criollo y FSV-1

Muestra	Día	% Humedad alcanzado
Variedad FSV-1	10	20
Variedad Criolla	11	17

Nota: Elaboración del autor

Como se puede observar del lote 2 la humedad más baja obtenida del secado natural fue de 17% correspondiente a la variedad criolla y la más alta obtenida fue de 20% correspondiente a la variedad FSV-1, luego de transcurridos 9 y 10 días de secado respectivamente.

Elaboración de la curva de secado natural contra tiempo y humedad contra tiempo. A partir de los datos del secado natural se construyen las respectivas curvas de humedad y velocidad de acuerdo al promedio de los pesos.

Tabla 10.

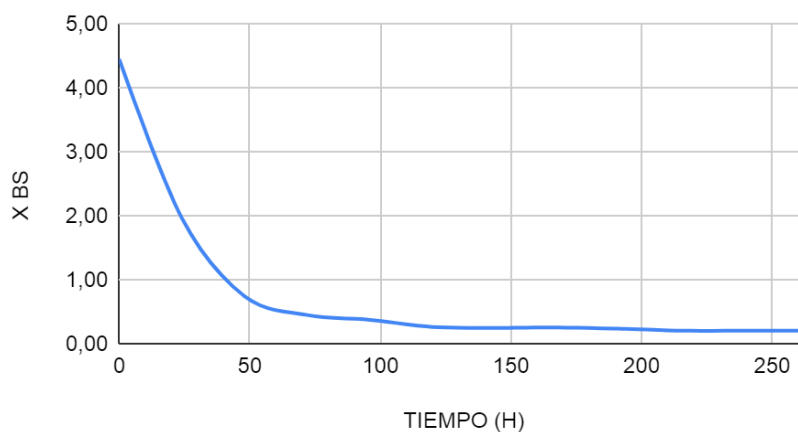
Determinación de humedad en base seca, humedad en base húmeda y velocidad de secado natural lote 1 variedad Cacao Criollo

TIEMPO (H)	PESO (g)	% HUMEDAD	% SÓLIDOS	MASA DE AGUA	MASA DE SÓLIDOS	X BH	X BS	X libre	Dx/Dt
0	366	81,68	18,32	299	67	0,82	4,46	4,25	0,10
24	299	66,33	33,67	198	101	0,66	1,97	1,76	0,05
48	243	42,78	57,22	104	139	0,43	0,75	0,54	0,01
72	157	31,17	68,83	49	108	0,31	0,45	0,25	0,00
96	114	27,42	72,58	31	83	0,27	0,38	0,17	0,00
120	100	21,05	78,95	21	79	0,21	0,27	0,06	0,00
144	77	20,14	79,86	16	62	0,20	0,25	0,04	0,00
168	74	20,48	79,52	15	59	0,20	0,26	0,05	0,00
192	75	19,23	80,77	14	61	0,19	0,24	0,03	0,00
216	70	17,20	82,80	12	58	0,17	0,21	0,00	0,00
240	63	17,20	82,80	11	52	0,17	0,21	0,00	0,00
264	63	17,20	82,80	11	52	0,17	0,21	0,00	0,00

Nota: Elaboración del autor

Figura 1.

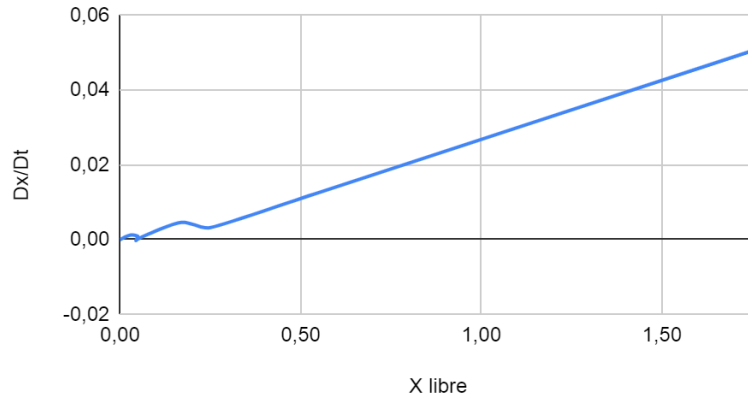
Curva humedad contra tiempo del bagazo variedad cacao Criollo Lote 1



Nota: Elaboración del autor

Figura 2.

Curva de velocidad secado natural del bagazo variedad cacao Criollo Lote 1



Nota: Elaboración del autor

Las humedades presentadas fueron variables a través del tiempo, especialmente por la incidencia del clima, ganando peso en las mañanas y volviendo al proceso de pérdida de humedad en las jornadas de mayor incidencia solar (medio día). La mayoría de las cáscaras del bagazo de cacao no presentan cambio significativo en el peso a partir del décimo día, llegando de esta manera a una humedad del 17%.

Lote 2: Tal como se muestra en las tablas de registro de pesos, se realiza seguimiento a las dos variedades cada 24 horas, obteniéndose las siguientes curvas de secado:

Tabla 11.

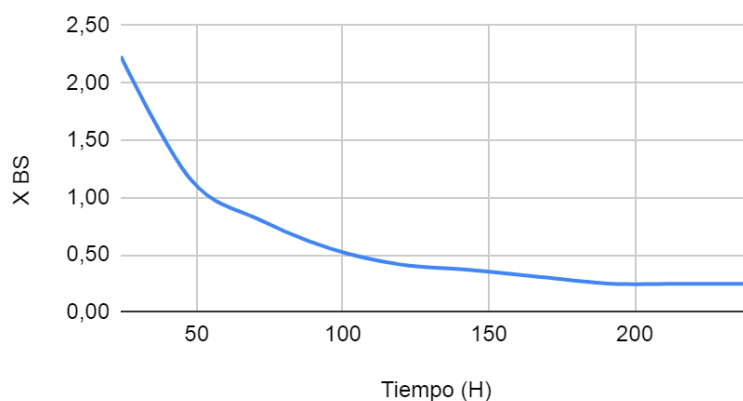
Determinación de humedad en base seca, humedad en base húmeda y velocidad de secado natural lote 2 variedad FSV-1

DIA	TIEMPO (H)	PESO (g)	% HUMEDAD	% SÓLIDOS	MASA DE AGUA	MASA DE SÓLIDOS	X BH	X BS	X libre	Dx/Dt
0	0	3070	86,48	13,52	2655	415	0,86	6,40	6,15	0,17
1	24	2655	69,06	30,94	1833	822	0,69	2,23	1,98	0,04
2	48	2120	53,58	46,42	1136	984	0,54	1,15	0,91	0,01
3	72	1645	44,46	55,54	731	914	0,44	0,80	0,55	0,01
4	96	1365	35,57	64,43	486	879	0,36	0,55	0,30	0,01
5	120	1092	29,32	70,68	320	772	0,29	0,41	0,17	0,00
6	144	900	26,87	73,13	242	658	0,27	0,37	0,12	0,00
7	168	825	23,45	76,55	193	632	0,23	0,31	0,06	0,00
8	192	720	19,87	80,13	143	577	0,20	0,25	0,00	0,00
9	216	610	19,87	80,13	121	489	0,20	0,25	0,00	0,00
10	240	610	19,87	80,13	121	489	0,20	0,25	0,00	0,00

Nota: Elaboración del autor

Figura 3.

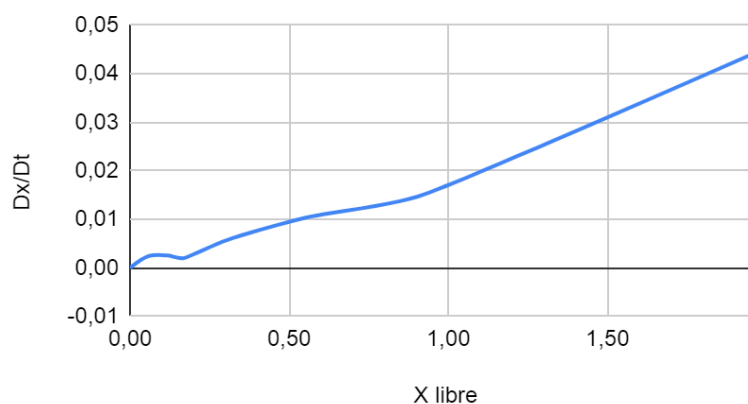
Curva humedad contra tiempo del bagazo variedad FSV-1 Lote 2



Nota: Elaboración del autor

Figura 4.

Curva de velocidad secado natural del bagazo variedad FSV-1 Lote 2



Nota: Elaboración del autor

Tabla 12.

Determinación de humedad en base seca, humedad en base húmeda y velocidad de secado natural lote 2 variedad Criolla

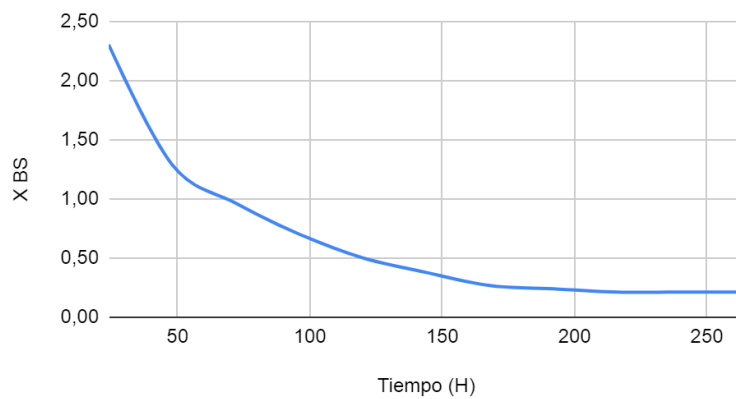
DIA	TIEMPO (H)	PESO (g)	% HUMEDAD	% SÓLIDOS	MASA DE AGUA	MASA DE SÓLIDOS	X BH	X BS	X libre	Dx/Dt
0	0	4015	83,94	16,06	3370	645	0,84	5,22	5,01	0,12
1	24	3370	69,74	30,26	2350	1020	0,70	2,30	2,09	0,04
2	48	2800	56,29	43,71	1576	1224	0,56	1,29	1,08	0,01
3	72	2260	49,07	50,93	1109	1151	0,49	0,96	0,75	0,01
4	96	1970	41,22	58,78	812	1158	0,41	0,70	0,49	0,01
5	120	1655	33,37	66,63	552	1103	0,33	0,50	0,29	0,01

6	144	1340	27,40	72,60	367	973	0,27	0,38	0,17	0,00
7	168	1100	21,05	78,95	232	868	0,21	0,27	0,06	0,00
8	192	845	19,30	80,70	163	682	0,19	0,24	0,03	0,00
9	216	775	17,43	82,57	135	640	0,17	0,21	0,00	0,00
10	240	700	17,43	82,57	122	578	0,17	0,21	0,00	0,00
11	264	700	17,43	82,57	122	578	0,17	0,21	0,00	0,00

Nota: Elaboración del autor

Figura 5.

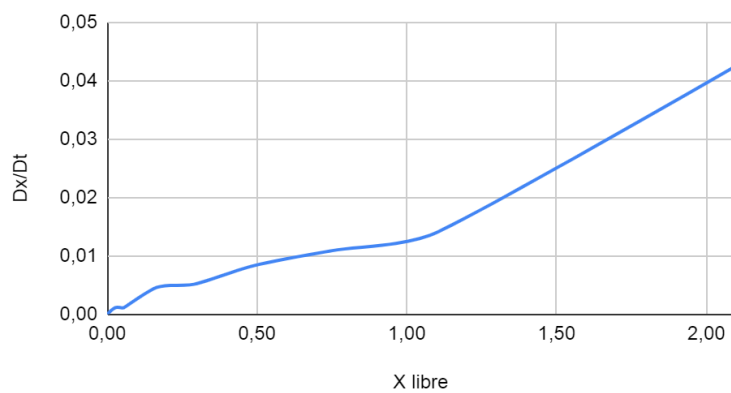
Curva humedad contra tiempo del bagazo variedad Criolla Lote 2



Nota: Elaboración del autor

Figura 6.

Curva de velocidad secado natural del bagazo variedad Criolla Lote 2



Nota: Elaboración del autor

Las humedades presentadas fueron también variables a través del tiempo, especialmente por la incidencia del clima. En el noveno día las cáscaras de bagazo de cacao de la variedad FSV-1 no presentan cambio significativo en el peso, alcanzando una máxima humedad de 20%. En el décimo día

las cáscaras de bagazo de cacao de la variedad Criolla no presentan cambio significativo en el peso, alcanzando una máxima humedad de 17%.

Secado forzado de la biomasa residual en mufla a 105 °C e intervalos de 3 h. Una vez terminado el proceso de secado natural, se da inicio al secado forzado. Para el desarrollo de esta actividad se aplicaron los procedimientos descritos en la norma ASTM E1756, así:

1. Se tomaron 14 placas petri de 15 centímetros de diámetro aproximadamente. Se procedió a lavarlas con agua y jabón neutro, para luego ser ingresadas en el horno de secado del laboratorio de físico química del centro de formación a 105°C durante una hora. Los recipientes se enfrían a temperatura ambiente en el desecador y luego se procede a marcarlos, para conformar 12 muestras y 2 adicionales para la comparación del proceso de secado.
2. Se toman alrededor de 50 gramos de las 12 muestras de cáscaras de cacao, tomando en cuenta lo referenciado en la norma ASTM 871 - 82.
3. Se pesa cada recipiente en la balanza analítica al 0,1 mg registrándose esto como la masa del contenedor, mc.
4. Se procede a registrar el peso de la biomasa más el contenedor como masa inicial, mi.
5. Se colocó la muestra en el horno de secado a 105 +/- 3 °C durante 3 h. Las muestras se enfrían a temperatura ambiente en un desecador y se realiza el seguimiento de su peso en la balanza analítica. Se repite este procedimiento hasta que la masa de las muestras presentó una variación de menos de 0,3 mg o 0,2% del anterior peso. Se registra esta masa como la masa final, mf.
6. Para el cálculo del porcentaje de humedad se aplica la fórmula descrita en la ASTM E871-82:

Humedad en la muestra de análisis, % = $[(W_i - W_f)/(W_i - W_c)] \times 100$

Donde:

- W_c = peso del contenedor, g,
- W_i = peso inicial, g, y
- W_f = peso final, g.

Seguimiento con gravimetría discontinua y medición de humedad. Para el primer lote se determina realizar seguimiento del peso de las muestras cada 2 Horas. Para el segundo lote se opta por realizar seguimiento del peso de las muestras cada 3 horas, obteniéndose así los siguientes registros de pesos y porcentaje de pérdida de humedad:

Lote 1: Se realiza el secado forzado el día viernes 26 de mayo.

- Hora inicio secado 1: 11:11 a.m.
- Hora inicio secado 2: 2:14 p.m.
- Hora inicio secado 3: 5:06 p.m.
- Hora inicio secado 4: 7:52 p.m.
- Hora inicio secado 5: 10:45 p.m.

De acuerdo con los resultados del secado forzado se obtuvieron los siguientes porcentajes de humedad:

Tabla 13.

Porcentaje de humedad secado forzado lote 1 variedad Cacao Criollo

Muestra	% Humedad
1	9
2	11
3	10
4	10
5	9
6	8
7	9
8	10
9	10
10	10
11	13
12	8
PROMEDIO	10

Nota: Elaboración del autor

Como se puede observar del lote 1 la humedad más baja obtenida del secado forzado fue de 8% y la más alta obtenida fue de 13%, luego de transcurridos 10 horas de secado. Vale resaltar que este proceso se realiza con las muestras de cáscaras de cacao que fueron secadas a la intemperie, partiendo de la humedad máxima alcanzada en este proceso de secado inicial.

Lote 2: Se realiza el secado forzado el sábado 5 de agosto de 2023, esta vez empleando muestras frescas, es decir, sin haberse realizado un secado a la intemperie como en el lote 1. Para el desarrollo de esta actividad se preparan 6 muestras por cada tipología de variedades seleccionadas: Variedad FSV-1 y Variedad Criolla.

Tabla 14.

Porcentaje de humedad secado forzado lote 2 variedad Cacao Criollo y FSV-1

Muestra	Variedad	% Humedad
1	Variedad Criolla	15
2	Variedad FSV-1	13
3	Variedad Criolla	14
4	Variedad FSV-1	14

5	Variedad Criolla	15
6	Variedad FSV-1	13
7	Variedad Criolla	14
8	Variedad FSV-1	14
9	Variedad Criolla	14
10	Variedad FSV-1	13
11	Variedad Criolla	15
12	Variedad FSV-1	14
PROMEDIO VARIEDAD CRIOLLA		14,5
PROMEDIO VARIEDAD FSV-1		13,5

Nota: Elaboración del autor

Como se puede observar del lote 2 la humedad más baja obtenida del secado forzado fue de 13% y la más alta obtenida fue de 15%, luego de transcurridos 21 horas de secado. De las dos variedades en estudio, la variedad roja FSV-1 logra el más bajo porcentaje de humedad.

Elaboración de la curva de secado forzado contra tiempo y humedad contra tiempo. El proceso de secado forzado se detiene cuando las cáscaras presentan una variación del peso menor a 0,3 mg o 0,2%. A partir del análisis de los datos se obtienen las siguientes curvas de secado:

Tabla 15.

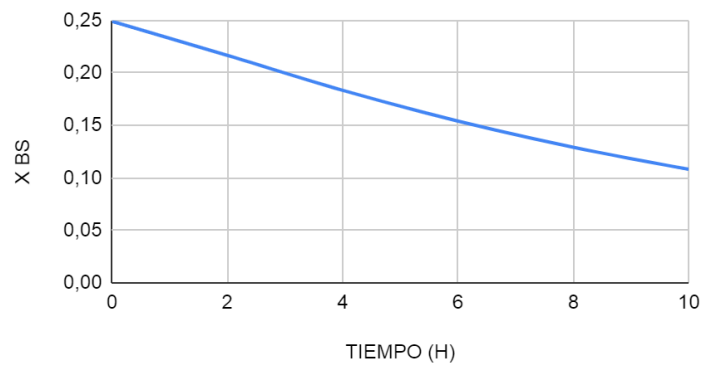
Determinación de humedad en base seca, humedad en base húmeda y velocidad de secado forzado lote 1 variedad Criolla

TIEMPO (H)	PESO (g)	% HUMEDAD	% SÓLIDOS	MASA DE AGUA	MASA DE SÓLIDOS	X BH	X BS	X libre	Dx/Dt
0	50	0,20	0,80	10	40	0,20	0,25	0,14	0,02
2	45	0,18	0,82	8	37	0,18	0,22	0,11	0,02
4	44	0,16	0,84	7	37	0,16	0,18	0,08	0,01
6	43	0,13	0,87	6	37	0,13	0,15	0,05	0,01
8	43	0,11	0,89	5	38	0,11	0,13	0,02	0,01
10	43	0,10	0,90	4	39	0,10	0,11	0,00	0,00

Nota: Elaboración del autor

Figura 7.

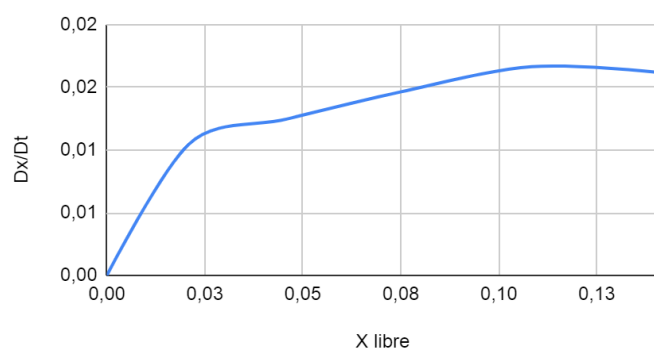
Curva humedad contra tiempo del bagazo variedad Criolla Lote 1



Nota: Elaboración del autor

Figura 8.

Curva de velocidad secado forzado del bagazo variedad Criolla Lote 1



Nota: Elaboración del autor

Tabla 16.

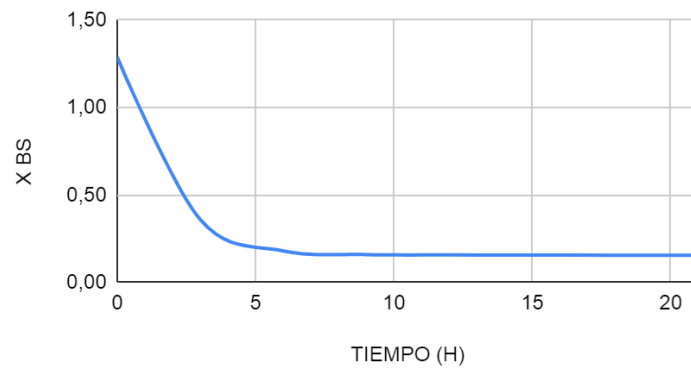
Determinación de humedad en base seca, humedad en base húmeda y velocidad de secado forzado lote 2 variedad FSV-1

TIEMPO (H)	PESO (g)	% HUMEDAD	% SÓLIDOS	MASA DE AGUA	MASA DE SÓLIDOS	X BH	X BS	X libre	Dx/Dt
0	299	0,56	0,44	168,32	130,57	0,56	1,29	1,13	0,31
3	168	0,26	0,74	44,58	123,74	0,26	0,36	0,20	0,06
6	79	0,15	0,85	12,13	67,03	0,15	0,18	0,02	0,01
9	46	0,14	0,86	6,31	39,48	0,14	0,16	0,00	0,00
12	41	0,14	0,86	5,62	35,60	0,14	0,16	0,00	0,00
15	41	0,14	0,86	5,55	35,23	0,14	0,16	0,00	0,00
18	41	0,14	0,86	5,49	35,18	0,14	0,16	0,00	0,00
21	40	0,14	0,86	5,45	34,92	0,14	0,16	0,00	0,00

Nota: Elaboración del autor

Figura 9.

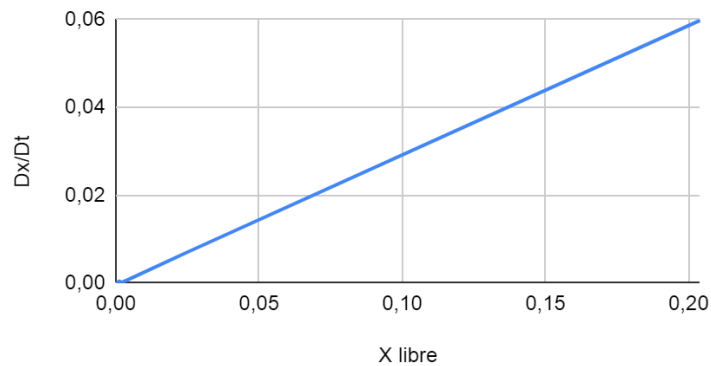
Curva humedad contra tiempo del bagazo variedad FSV-1 Lote 2



Nota: Elaboración del autor

Figura 10.

Curva de velocidad secado forzado del bagazo variedad FSV-1 Lote 2



Nota: Elaboración del autor

Tabla 17.

Determinación de humedad en base seca, humedad en base húmeda y velocidad de secado forzado lote 2 variedad Criolla

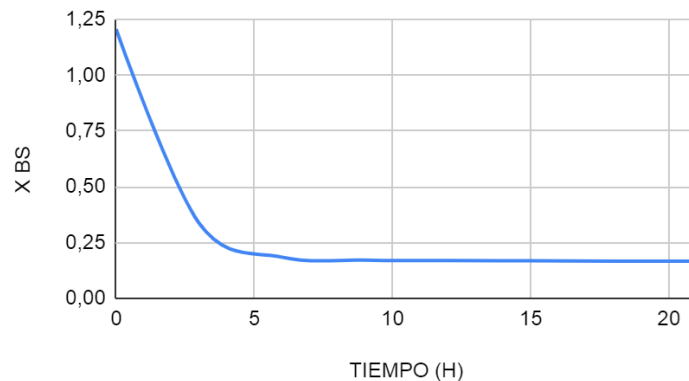
TIEMPO (H)	PESO (g)	% HUMEDAD	% SÓLIDOS	MASA DE AGUA	MASA DE SÓLIDOS	X BH	X BS	X libre	Dx/Dt
0	298	0,55	0,45	163,22	135,23	0,55	1,21	1,04	0,29
3	163	0,25	0,75	41,19	122,03	0,25	0,34	0,17	0,05
6	75	0,16	0,84	11,73	63,59	0,16	0,18	0,02	0,00
9	46	0,15	0,85	6,79	39,69	0,15	0,17	0,00	0,00
12	44	0,14	0,86	6,31	37,30	0,14	0,17	0,00	0,00
15	43	0,14	0,86	6,22	36,95	0,14	0,17	0,00	0,00
18	43	0,14	0,86	6,16	36,86	0,14	0,17	0,00	0,00

21	43	0,14	0,86	6,12	36,62	0,14	0,17	0,00	0,00
----	----	------	------	------	-------	------	------	------	------

Nota: Elaboración del autor

Figura 11.

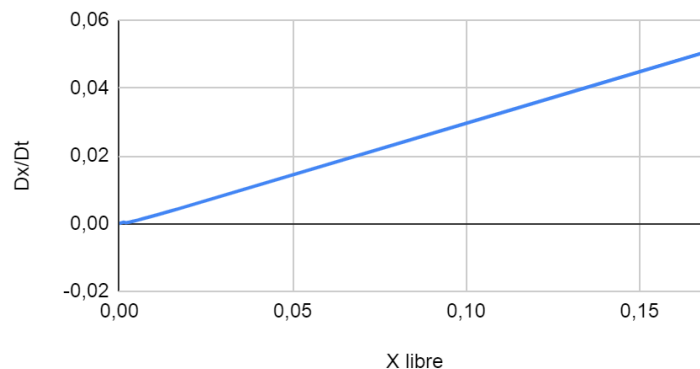
Curva humedad contra tiempo del bagazo variedad Criolla Lote 2



Nota: Elaboración del autor

Figura 12.

Curva de velocidad secado forzado del bagazo variedad Criolla Lote 2



Nota: Elaboración del autor

Como se puede observar la variedad criolla requiere de un tiempo 9 horas para llegar a la humedad más alta adecuada para la peletización (15%) y la variedad FSV-1 un tiempo de 6 horas. Con base en las humedades se calculan las horas adicionales que se requieren para lograr el porcentaje de humedad mínimo en estudio (10%).

Obtención del rango de valores deseados de humedad. Una vez calculado el contenido de humedad y obtenido las curvas de secado forzado de las muestras de bagazo de cacao, se procede a seleccionar los dos niveles de humedad (alta y baja) con base en el ratio consumo energético/tiempo y los rangos reportados de humedad apropiados para la peletización de la biomasa (10 - 15 % p/p). Para el cálculo del consumo energético se aplica la fórmula: Potencia * tiempo, teniendo en cuenta las características de funcionamiento del equipo de secado empleado:

- Equipo de secado: Estufa/Horno
- Marca: Binder
- Modelo: ED 115

- Voltaje de operación: 110 V
- Corriente de operación: 14A
- Potencia de consumo: 1,60 kW
- Frecuencia 60 HZ
- Temperatura de operación máxima: 300 °C
- Temperatura de operación para el secado: 105°C

De lo anterior, se genera la siguiente tabla de comportamiento de secado forzado para alcanzar los dos niveles de humedad apropiados:

Tabla 18.

Consumos energéticos del proceso de secado forzado por variedad de bagazo de cacao

Variedad	Humedad	Tiempo	Humedad	Tiempo	Potencia de consumo	Consumo Energético	
	Alta	H	Baja	H	kw	Alta	Baja
Criolla	15	9	10	27	1.60	14.4 kwh	43,2kw
FSV-1	15	6	10	24	1.60	9.6 KWh	38,4 KW

Nota: Elaboración del autor

De acuerdo al ratio entre el consumo energético y el tiempo transcurrido para el secado forzado, se concluye que la variedad criolla requiere de mayor tiempo y por ende, mayor gasto energético para lograr las humedades apropiadas para la peletización. Con el bagazo recibido y seco se procede a realizar la trituration y tamizado seleccionando dos tamaños de grano (250 y 500 micras) de acuerdo con las variables de estudio establecidas.

Cálculo del Poder Calorífico Teórico y Experimental del Bagazo Recibido y Particulado.

Tal como se define en el diseño metodológico, En esta sección se llevaron a cabo caracterizaciones que incluyen el análisis elemental, el análisis próximo y el análisis estructural (según ASTM E-1756 y E-1757) del bagazo de cacao recibido y particulado. El análisis elemental proporcionó información sobre el porcentaje en peso de carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno presentes en el bagazo. El análisis próximo ofreció los porcentajes de volátiles, cenizas y carbono fijo. Por otro lado, el análisis estructural detalló los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa en los residuos.

Estos datos han sido utilizados para calcular de manera analítica el poder calorífico inferior (PCI) y superior (PCS) de los residuos mediante las fórmulas de Dulong. Posteriormente, estos valores calculados se comparan con mediciones experimentales obtenidas a través de una bomba calorimétrica.

Análisis Estructural. Previo a la peletización, se realiza la determinación del contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, realizando estos estudios en apoyo con el laboratorio de biotecnología de Tecnoparque Nodo Bucaramanga; obteniéndose los siguientes resultados para cada variedad:

Tabla 19.*Contenido de Lignina, Celulosa y Hemicelulosa por variedad de bagazo de cacao*

Variedad	Lignina	Método	Holocelulosa	Método	Celulosa	Método	Hemicelulosa
Criolla	12,13%	Lignina Klason	13,26	Técnica de Browning	26,07%	Norma ANSI/AST M (1977b)	12,81%
FSV-1	8,21%	Lignina Klason	28,55	Técnica de Browning	41,73%	Norma ANSI/AST M (1977b)	13,18%

Nota: Elaboración del autor

Los datos del análisis estructural arrojan que la variedad criolla presenta una mayor proporción de lignina (12,13%), lo que puede contribuir a una mayor densidad energética y resistencia mecánica en los pellets. Por su parte, la variedad FSV-1 tiene un contenido significativamente mayor de celulosa (41,73%), lo que la posiciona como una opción más favorable desde el punto de vista energético, puesto que se considera un componente crucial en la generación de energía térmica durante la combustión, ya que la celulosa tiene la propiedad de descomponerse para liberar calor de manera eficiente. La hemicelulosa tiende a descomponerse más fácilmente que la lignina y la celulosa, por lo que su presencia puede influir en la velocidad de liberación de energía térmica, siendo igualmente mayor en la variedad FSV-1 (13,18%).

Análisis Próximo. Este análisis proporciona detalles esenciales sobre la composición de la biomasa, crucial para comprender su combustibilidad y propiedades energéticas. En esta etapa se determina el porcentaje de humedad que se encuentra en la biomasa y el material inorgánico (cenizas), así como, la masa liberada como gas durante la combustión (material volátil), y el residuo sólido después de liberada la materia volátil (Carbono fijo).

Tabla 20.*Contenido de Humedad, Materia Volátil (M.V.), Ceniza y Carbono Fijo (C.F.) por variedad de bagazo de cacao*

Variedad	Tamaño partícula (micras)	%Humedad	%M.V.	%Ceniza	%C.F.	TOTAL
FSV-1	250	8	69,3	1,77	28,93	100
FSV-1	250	10	70,2	3,7	26,1	100
FSV-1	500	10	70,1	0,67	29,23	100
FSV-1	500	15	73,56	2,99	23,45	100
CRIOLLA	250	8	68,01	3,82	28,17	100
CRIOLLA	250	10	70,04	4,02	25,94	100
CRIOLLA	500	10	69,73	1,55	28,72	100
CRIOLLA	500	15	76,41	2,45	21,14	100

Nota: Elaboración del autor

De las anteriores variables, el contenido de carbono fijo es considerado un componente clave en la estimación del potencial energético de la biomasa, significando mayor producción de calor durante la combustión, por ende su resultado teniendo en cuenta la variedad, tamaño de partícula y contenido de humedad, se evalúan mediante un Análisis estadístico de Varianza (ANOVA).

Tabla 21.
Regresión Lineal

Medidas de Ajuste del Modelo

Modelo	R	R ²
1	0.973	0.948

Prueba Omnibus ANOVA

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Tamaño de Partícula	9.70	1	9.703	15.6	0.011
Humedad	51.01	1	51.006	81.8	< .001
Residuos	3.12	5	0.623		

Nota. Suma de cuadrados tipo 3

Coefficientes del Modelo - %C.F.

Predictor	Estimador	EE	t	p
Constante	36.2291	1.19564	30.30	< .001
Tamaño de Partícula	0.0120	0.00303	3.95	0.011
Humedad	-1.3262	0.14662	-9.05	< .001

Nota: Elaboración del autor

El análisis de regresión revela que los coeficientes del modelo proporcionan información sobre la relación entre las variables independientes (Humedad y Tamaño de Partícula) y la variable dependiente (Carbono Fijo). La constante o intercepto indica el valor esperado de Carbono Fijo cuando todas las variables independientes son cero (36.2291%). El coeficiente de Humedad (-1.3262) sugiere una relación negativa, indicando que, en promedio, el Carbono Fijo disminuye en 1.3262 unidades por cada unidad de aumento en Humedad. El coeficiente de Tamaño de Partícula (0.0120) sugiere una relación positiva, con un aumento promedio de 0.0120 unidades en Carbono Fijo por cada unidad de aumento en Tamaño de Partícula.

Las medidas de ajuste del modelo (R y R²) indican una fuerte correlación positiva y que aproximadamente el 94.8% de la variabilidad en Carbono Fijo puede explicarse por las variables independientes en el modelo. La Prueba Omnibus ANOVA confirma la significancia global del modelo. Para Tamaño de Partícula (p = 0.011), hay evidencia significativa de su efecto en Carbono Fijo, mientras que para Humedad (p < 0.01), también se encuentra evidencia significativa. En resumen, ambas

variables parecen tener efectos significativos en Carbono Fijo, respaldando la relevancia global del modelo.

A partir de los datos del análisis próximo y análisis ANOVA, se determina que a menor contenido de humedad en la cáscara de cacao, mayor será el contenido de carbono fijo. Se evidencia que el contenido de carbono fijo aumenta en tamaños de partícula de 500 micras, arrojando de manera preliminar, que para la fabricación de los pellets y obtención de un biocombustible óptimo, deben emplearse materiales con tamaños de partícula superior a 500 micras. En cuanto a las variedades en estudio, la cáscara de cacao de la variedad FSV-1, arrojó MAYOR contenido de carbono fijo para las diferentes humedades y tamaños de partícula, presentando un porcentaje promedio de su incremento, del 2,18% en humedades bajas y del 4,98% en humedad altas.

Análisis Elemental. El análisis elemental permite determinar la composición específica de la biomasa, incluyendo la cantidad de carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno. El contenido de carbono e hidrógeno en la biomasa está directamente relacionado con su eficiencia de combustión, dado que, cuanto mayor sea la proporción de carbono e hidrógeno, mayor será la densidad energética de la biomasa y, por lo tanto, su capacidad para generar calor durante la combustión.

Tabla 22.

Contenido de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Azufre y Nitrógeno por variedad de bagazo de cacao

Variedad	Tamaño partícula (micras)	% Humedad	% Carbono	% Hidrógeno	% Oxígeno	% Azufre	% Nitrógeno
FSV-1	250	8	41	10,6	46	0,4	2
FSV-1	250	10	40	9,8	47	0,2	3
FSV-1	500	10	43	9	45,6	0,4	2
FSV-1	500	15	42,8	10	45	0,2	2
CRIOLLA	250	8	42	9,5	45,3	0,2	3
CRIOLLA	250	10	40	10,8	46	0,2	3
CRIOLLA	500	10	44	7,7	46	0,3	2
CRIOLLA	500	15	42	9,8	45	0,2	3

Nota: Elaboración del autor

Al igual que en la evaluación del contenido de carbono fijo, se realiza un Análisis estadístico de Varianza (ANOVA) a fin de determinar el impacto de las variables tamaño de partícula y contenido de humedad sobre el % de carbono e hidrógeno.

Tabla 23.

Regresión Lineal

Medidas de Ajuste del Modelo

Modelo	R	R ²
1	0.917	0.842

Prueba Omnibus ANOVA

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Tamaño de Partícula	11.28	1	11.281	24.65	0.004
Humedad	2.49	1	2.491	5.44	0.067
Residuos	2.29	5	0.458		

Nota. Suma de cuadrados tipo 3

Coefficientes del Modelo - Carbono

Predictor	Estimador	EE	t	p
Constante	40.1621	1.02450	39.20	< .001
Tamaño de Partícula	0.0129	0.00260	4.96	0.004
Humedad	-0.2931	0.12563	-2.33	0.067

Nota: Elaboración del autor

Los estimadores o coeficientes obtenidos en la tabla de "Coeficientes del Modelo" del análisis de regresión proporcionan información sobre la relación entre las variables independientes "Humedad" y "Tamaño de Partícula" y la variable dependiente "Carbono". La constante (intercepto) de 40.1621 (%) indica el valor esperado de la variable dependiente cuando todas las variables independientes son cero. El coeficiente positivo para "Tamaño de Partícula" (0.0129) sugiere que, manteniendo constante "Humedad", se espera un aumento en el % de Carbono con un aumento en el "Tamaño de Partícula". El coeficiente negativo para "Humedad" (-0.2931) sugiere que, manteniendo constante "Tamaño de Partícula", se espera una disminución en el % de Carbono con un aumento en la "Humedad".

En general, las variables "Tamaño de Partícula" y "Humedad" parecen tener efectos significativos en el % de Carbono, según los valores p bajos (<0.05). Las estadísticas "t" indican la magnitud relativa de estos efectos.

Tabla 24.
Regresión Lineal

Medidas de Ajuste del Modelo

Modelo	R	R ²
--------	---	----------------

1 0.828 0.686

Prueba Omnibus ANOVA

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Tamaño de Partícula	4.54	1	4.537	10.86	0.022
Humedad	2.35	1	2.347	5.62	0.064
Residuos	2.09	5	0.418		

Nota. Suma de cuadrados tipo 3

Coefficientes del Modelo - Hidrógeno

Predictor	Estimador	EE	t	p
Constante	9.66034	0.97857	9.87	< .001
Tamaño de Partícula	-0.00818	0.00248	-3.30	0.022
Humedad	0.28448	0.12000	2.37	0.064

Nota: Elaboración del autor

En cuanto a la variable dependiente %Hidrógeno, la constante (intercepto) de 9.66034 (%) indica el valor esperado de la variable dependiente cuando todas las variables independientes son cero. El coeficiente negativo para "Tamaño de Partícula" (-0.00818) sugiere que, manteniendo constante "Humedad", se espera una disminución en el % de Hidrógeno con un aumento en el "Tamaño de Partícula". El coeficiente positivo para "Humedad" (0.28448) sugiere que, manteniendo constante "Tamaño de Partícula", se espera un aumento en el % de Hidrógeno con un aumento en la "Humedad". En general, las variables "Tamaño de Partícula" y "Humedad" parecen tener efectos significativos en el % de Hidrógeno, según los valores p bajos (<0.05).

Tabla 25.
Regresión Lineal

Medidas de Ajuste del Modelo

Modelo	R	R ²
1	0.594	0.353

Prueba Omnibus ANOVA

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
--	-------------------	----	------------------	---	---

Tamaño de Partícula	0.171	1	0.171	0.427	0.542
Humedad	0.182	1	0.182	0.455	0.530
Residuos	2.005	5	0.401		

Nota. Suma de cuadrados tipo 3

Coefficientes del Modelo - Oxígeno

Predictor	Estimador	EE	t	p
Constante	47.18621	0.95894	49.206	< .001
Tamaño de Partícula	-0.00159	0.00243	-0.653	0.542
Humedad	-0.07931	0.11759	-0.674	0.530

Nota: Elaboración del autor

Por su parte, tomando como variable dependiente %Oxígeno, la constante (intercepto) de 47.18621 (%) indica el valor esperado de % de oxígeno cuando ambas variables independientes son cero. Los coeficientes para "Tamaño de Partícula" y "Humedad" no son estadísticamente significativos, ya que los valores p son mayores que 0.05. Esto sugiere que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que los coeficientes son igual a cero. El valor R² de 0.353 indica que el modelo explica aproximadamente el 35.3% de la variabilidad en el % de oxígeno. Los p-valores en la prueba ANOVA para ambas variables son mayores que 0.05, lo que sugiere que el modelo en su conjunto no es estadísticamente significativo para predecir el % de oxígeno. En resumen, el modelo de regresión para predecir el % de oxígeno con las variables Tamaño de Partícula y Humedad no es estadísticamente significativo, significando que las variables no tienen un efecto significativo en la predicción del % de oxígeno, según los valores p y las estadísticas de la prueba ANOVA.

Por tanto, los datos del análisis elemental confirman que a menor contenido de humedad en la cáscara de cacao, mayor será el contenido de carbono. Sin embargo, respecto al contenido de hidrógeno, se observa que en la mayoría de las muestras, este es más alto en niveles de humedad elevados, a excepción de la variedad FSV-1 con un tamaño de partícula de 250 micras. Además, se evidencia que el contenido de carbono aumenta en tamaños de partículas de 500 micras, pero este patrón no se refleja en el contenido de hidrógeno, que es más alto en tamaños de partículas de 250 micras. La observación de que el contenido de carbono aumenta con la disminución del contenido de humedad en la cáscara de cacao es consistente con la composición elemental de la biomasa. A medida que la humedad disminuye, la proporción de carbono en relación con otros elementos puede aumentar, ya que el agua es un componente que contribuye a reducir la concentración de los elementos combustibles.

En cuanto al contenido de hidrógeno, su comportamiento puede estar relacionado con la forma en que interactúa con la estructura de la biomasa. En general, el hidrógeno tiende a formar enlaces más fácilmente en entornos con mayores niveles de humedad. Por lo tanto, es plausible que en humedades más altas, el contenido de hidrógeno sea mayor. La variación en los resultados según el tamaño de partícula podría deberse a la influencia de la estructura física de la biomasa en la distribución y accesibilidad de los diferentes elementos. La descomposición de la biomasa puede ser afectada por varios factores, incluido el tamaño de partícula, que afecta la velocidad de secado y la

exposición superficial. En cuanto a las variedades en estudio, la cáscara de cacao de la variedad CRIOLLA, arrojó MAYOR contenido de carbono en humedades bajas, pero siendo mayor el contenido de hidrógeno en las cáscaras de la variedad FSV-1.

Determinación del Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) Analíticamente: Dado los resultados obtenidos del análisis elemental, se procede a calcular el poder calorífico superior e inferior de la biomasa aplicando las *Fórmulas de Dulong*, para luego ser comparados con las mediciones experimentales obtenidas de la bomba calorimétrica. Las fórmulas de Dulong son utilizadas para estimar el poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) de un combustible a partir de su composición elemental. Estas fórmulas son empíricas y están basadas en la relación entre el contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre del combustible.

Para la determinación del Poder Calorífico Superior (PCS) se aplica la siguiente ecuación:

$$PCS (Kcal/Kg) = 8140 \times C + 34400 \times H - \left(\frac{O}{8}\right) + 2220 \times S$$

Para la determinación del Poder Calorífico Inferior (PCI) se aplica la siguiente ecuación:

$$PCI (Kcal/Kg) = 8140 \times C + 29000 \times H - \left(\frac{O}{8}\right) + 2220 \times S$$

Donde:

- C es el porcentaje en peso de carbono en la biomasa.
- H es el porcentaje en peso de hidrógeno en la biomasa.
- O es el porcentaje en peso de oxígeno en la biomasa.
- S es el porcentaje en peso de azufre en la biomasa.

Tabla 26.

Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) Teórico

Variedad	Tamaño de partícula	% Humedad	PCS (KCAL/KG)	PCI (KCAL/KG)
FSV-1	250	8	5014,68	4752,78
	250	10	4610,64	4398,69
FSV-1	500	10	4644,28	4466,08
	500	15	4993,36	4757,11
CRIOLLA	250	8	4743,34	4536,115
	250	10	4997,64	4724,94
CRIOLLA	500	10	4259,06	4153,76

	500	15	4859,44	4633,99
--	-----	----	---------	---------

Nota: Elaboración del autor

Con los datos obtenidos de PCS Y PCI se realiza un Análisis estadístico de Varianza (ANOVA) a fin de determinar el impacto de las variables tamaño de partícula y contenido de humedad sobre el potencial energético de la biomasa según variedad, específicamente sobre el PCI.

Tabla 27.

Regresión Lineal

Medidas de Ajuste del Modelo

Modelo	R	R ²
1	0.642	0.412

Prueba Omnibus ANOVA

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Tamaño de Partícula	106317	1	106317	2.93	0.148
Humedad	107164	1	107164	2.95	0.146
Residuos	181417	5	36283		

Nota. Suma de cuadrados tipo 3

Coefficientes del Modelo - PCI

Predictor	Estimador	EE	t	p
Constante	4369.19	288.447	15.15	< .001
Tamaño de Partícula	-1.25	0.732	-1.71	0.148
Humedad	60.79	35.372	1.72	0.146

Nota: Elaboración del autor

La constante (intercepto) de 4369.19 (KCAL/KG) indica el valor esperado de la variable dependiente (PCI) cuando ambas variables independientes son cero. El coeficiente negativo para "Tamaño de Partícula" (-1.25) sugiere que, manteniendo constante "Humedad", se espera una disminución en el PCI por cada unidad de cambio en "Tamaño de Partícula". El coeficiente positivo para "Humedad" (60.79) sugiere que, manteniendo constante "Tamaño de Partícula", se espera un aumento en el PCI por cada unidad de cambio en "Humedad". Los valores "p" para ambas variables no son menores que 0.05, lo que sugiere que ni "Tamaño de Partícula" ni "Humedad" son estadísticamente significativos en este modelo. El valor R² de 0.412 indica que aproximadamente el

41.2% de la variabilidad en la variable dependiente se explica por las variables independientes en el modelo.

En el análisis ANOVA el valor de F (2.93) no es muy grande y, por sí solo, no sugiere una significancia estadística fuerte para la variable "Tamaño de Partícula". En términos prácticos, el modelo con "Tamaño de Partícula" no está demostrando un impacto significativo según esta prueba. Al igual que con "Tamaño de Partícula", un valor de F de 2.95 sugiere que el modelo con "Humedad" no está demostrando un impacto significativo según esta prueba. Los resultados proporcionados muestran el contenido energético del bagazo de cacao para la variedad FSV-1 y CRIOLLA en diferentes condiciones. En la variedad FSV-1, A medida que la humedad aumenta, tanto el Poder Calorífico Superior (PCS) como el Poder Calorífico Inferior (PCI) tienden a disminuir. Esto es esperado, ya que la presencia de agua reduce la concentración de los componentes combustibles, afectando el contenido energético de la biomasa. Comparando los resultados para la misma humedad, se observa que hay una ligera variación en los valores de PCS y PCI según el tamaño de partícula.

En algunos casos, el tamaño de partícula de 250 micras muestra valores ligeramente superiores a los de 500 micras, y viceversa. Esto podría deberse a la influencia del tamaño de partícula en la velocidad de secado y la exposición superficial de la biomasa. El PCS es siempre mayor que el PCI, lo cual es común y se debe a que el PCS incluye la liberación de calor latente de vaporización del agua producida durante la combustión. La diferencia entre PCS y PCI es más pronunciada a medida que aumenta la humedad. Dado lo anterior, la elección del tamaño de partícula y el control del contenido de humedad son aspectos clave para optimizar el rendimiento energético en el biocombustible.

Al igual que en la variedad FSV-1, EN LA VARIEDAD CRIOLLA a medida que la humedad aumenta, tanto el Poder Calorífico Superior (PCS) como el Poder Calorífico Inferior (PCI) tienden a disminuir. Se aprecia que el tamaño de partícula influye en los valores de PCS y PCI. En este caso, los resultados muestran que el tamaño de partícula de 250 micras tiende a tener valores más altos que el tamaño de 500 micras para la misma humedad. Como en la variedad FSV-1, el PCS es consistentemente mayor que el PCI. Esta diferencia es más evidente a medida que aumenta la humedad. La variación en los resultados entre las dos variedades puede deberse a diferencias en la composición química y estructural de los bagazos de cacao. Esto destaca la importancia de considerar las características específicas de cada tipo de biomasa al diseñar aplicaciones para su aprovechamiento.

Comparando las dos variedades, se observa que la variedad FSV-1 tiende a tener valores más altos de PCS y PCI en algunas condiciones en comparación con la variedad CRIOLLA. Esto podría influir en la elección de la variedad más adecuada para ciertas aplicaciones o procesos industriales.

Determinación del Poder Calorífico Superior Experimentalmente. Se determina el Poder Calorífico Superior mediante bomba calorimétrica para el residuo bruto, esto es, el bagazo de cacao sin triturar y tamizar, según variedad y contenido de humedad, así como, del residuo particulado y tamizado, según variedad, tamaño de partícula y contenido de humedad, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 28.

Poder Calorífico Superior (PCS) mediante bomba calorimétrica

Variedad	Tamaño de partícula	% Humedad	PCS (KCAL/KG)
----------	---------------------	-----------	---------------

FSV-1	Sin triturar	10	4876,1
	Sin triturar	15	4467,2
CRIOLLA	Sin triturar	10	4329,0
	Sin triturar	15	4079,0
FSV-1	250	8	4994,68
	250	10	4670,64
FSV-1	500	10	5084,28
	500	15	4523,28
CRIOLLA	250	8	4773,34
	250	10	4437,64
CRIOLLA	500	10	4489,06
	500	15	4199,44

Nota: Elaboración del autor

Con los datos obtenidos de PCS mediante Bomba Calorimétrica se realiza un Análisis estadístico de Varianza (ANOVA) a fin de determinar el impacto de las variables tamaño de partícula y contenido de humedad sobre el potencial energético de la biomasa según variedad.

Tabla 29.
Regresión Lineal

Medidas de Ajuste del Modelo

Modelo	R	R ²
1	0.695	0.483

Prueba Omnibus ANOVA

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
--	-------------------	----	------------------	---	---

Tamaño de Partícula	37129	1	37129	0.608	0.456
Humedad	476205	1	476205	7.798	0.021
Residuos	549579	9	61064		

Nota. Suma de cuadrados tipo 3

Coefficientes del Modelo - PCS

Predictor	Estimador	EE	t	p
Constante	5348.714	321.303	16.647	< .001
Tamaño de Partícula	0.273	0.350	0.780	0.456
Humedad	-74.126	26.544	-2.793	0.021

Nota: Elaboración del autor

El valor del estimador (-74.126) para la variable independiente "Humedad" en el análisis de regresión lineal sugiere una relación negativa entre "Humedad" y la variable dependiente "PCS". Es decir, a medida que la humedad aumenta, se espera que el valor de "PCS" disminuya en aproximadamente 74.126 unidades, manteniendo constante la variable Tamaño de partícula. El valor del estimador (0.273) para la variable independiente "Tamaño de Partícula" es positivo, esto sugiere una relación positiva entre "Tamaño de Partícula" y la variable dependiente "PCS". Es decir, a medida que el tamaño de partícula aumenta, se espera que el valor de "PCS" también aumente en aproximadamente 0.273 unidades, manteniendo constante la variable "Humedad" en el modelo. Un valor p de 0.021 es menor que el umbral común de significancia de 0.05. Esto sugiere que el coeficiente asociado con "Humedad" es estadísticamente significativo. En términos prácticos, la variable "Humedad" parece tener un impacto significativo en la variable dependiente (PCS) en este modelo.

Por su parte, un valor p de 0.456 es mayor que el umbral de significancia de 0.05. En términos prácticos, la variable "Tamaño de Partícula" no parece tener un impacto significativo en la variable dependiente (PCS) en este modelo. $R^2=0.483$ indica que el 48.3% de la variabilidad en la variable dependiente PCS puede ser explicada por las variables independientes Humedad y Tamaño de Partícula, significando un grado moderado de ajuste y que las variables independientes están contribuyendo significativamente a la variabilidad observada en el PCS. Los resultados obtenidos de PCS mediante bomba calorimétrica en ambas variedades arrojan que a una humedad del 10%, el PCS es superior que a una humedad del 15%. Esto indica que, como era de esperar, a medida que aumenta la humedad, el PCS tiende a disminuir. La diferencia en PCS entre las dos humedades proporciona información sobre cómo la variación en la humedad afecta el potencial energético de la biomasa sin triturar.

El análisis realizado corrobora que, al menos para las condiciones y variedades específicas proporcionadas, hay una influencia del tamaño de partícula en el PCS. Comparando la variedad FSV-1 con el mismo contenido de humedad (10%), se observa que el PCS es más alto para el tamaño de partícula de 500 micras (5084,28 Kcal/kg) en comparación con el tamaño de partícula de 250 micras (4670,64 Kcal/kg). Esta diferencia sugiere que, para esta variedad y contenido de humedad específicos, un tamaño de partícula más grande está asociado con un PCS más alto. En la variedad

CRIOLLA, la misma tendencia se observa al comparar el PCS para un contenido de humedad del 10%. El tamaño de partícula de 500 micras (4489,06 Kcal/kg) tiene un PCS más alto en comparación con el tamaño de partícula de 250 micras (4437,64 Kcal/kg).

Las diferencias entre los valores de PCS obtenidos por la bomba calorimétrica y las fórmulas de Dulong son normales, ya que los métodos miden diferentes aspectos del poder calorífico y utilizan enfoques distintos. La bomba calorimétrica proporciona resultados más precisos al medir directamente el calor liberado durante la combustión. Se observa que, en algunos casos, el tamaño de partícula y el contenido de humedad afectan los valores de PCS, lo cual es coherente con la literatura científica que sugiere que estas variables pueden influir en las propiedades caloríficas de los materiales. Las variedades FSV-1 y Criolla muestran diferentes valores, indicando que las propiedades caloríficas pueden variar entre ellas, lo cual es relevante al considerar la biomasa para su uso como biocombustible. En cuanto al PCI, este presenta un incremento promedio del 4% en comparación con el PCS. A nivel general, se determina un promedio de PCS y PCI para el bagazo FSV-1 del 20,15 Mj/kg y 19,22 Mj/kg respectivamente; y para el bagazo Criollo de 19,73 Mj/kg y 18,88 Mj/kg de PCS y PCI respectivamente.

Comparando estos resultados con el PCI de estudios aplicados en otras biomasa residuales producidas en Colombia, el bagazo de cacao presenta excelentes resultados:

Tabla 30.

Poder calorífico inferior biomasa primaria residual versus bagazo de cacao

Poder Calorífico Inferior Para Biomasa Primaria Residual			Bagazo De Cacao	
Cultivo	Tipo de Residuo (Primario)	PCI (MJ/KG)	Variedad FSV-1	Variedad Criolla
PALMA DE ACEITE	Raquis	18.55	19,22	18,88
CAÑA DE AZÚCAR	Hojas y cogollo	16.99		
CAÑA PANELERA	Hojas y cogollo	16.99		
CAFÉ	Hojas y tallo	20.22		
MAIZ	Rastrojo	15.82		
	Tusa	15.64		
	Capacho	17.61		
ARROZ	Tamo	15.28		
BANANO	Raquis	8.34		
	Vástago	9.37		

PLÁTANO	Raquis	8.34		
	Vástago	9.37		

Nota: Adaptado de “Estimación del Potencial Energético a Partir de la Biomasa Primaria Agrícola en el Departamento de Cundinamarca” (Quintero, C. A. & Quiroga, L. F., 2017).

Finalmente comparando el PCI obtenido con otros estudios realizados a cáscaras de cacao principalmente en Ecuador se obtiene lo siguiente:

Tabla 31.

Poder calorífico bagazo de cacao referencias

Tipo de Biomasa	PCS (MJ/kg)	PCI*(MJ/kg)	PCI** (MJ/kg)
Cáscara de cacao Nacional	15,29	12,90	12,41
Cáscara de cacao CCN – 51	14,89	12,44	13,02
Cáscara de cacao CCN – 51 PELLET	20,2	16,87	17,66

*Calculado a partir del valor del poder calorífico superior.

** Calculado a partir del análisis elemental

Nota: Adaptado de “Evaluación Energética de Cáscaras de Cacao Nacional y CCN-51” & “Estudio de las Posibilidades de Peletización de la Cáscara del Cacao Ecuatoriano y su uso Como Biocombustible” (Sánchez, J., 2013; Velázquez, L, et. al., 2015).

Como se puede observar, las cáscaras de cacao que fueron evaluadas en Ecuador presentan un incremento de su PCI al ser peletizadas. Comparando dicho caso con los resultados obtenidos del proyecto de investigación, se concluye que la cáscara de cacao producida en Santander presenta mayor PCI en estado particulado (18,88 Mj/kg y 19,22 Mj/kg), esperándose un aumento de su densidad energética al ser la biomasa peletizada.

Preparación de los Pellets.

Los pellets son biocombustibles sólidos producidos mediante la densificación en una peletizadora de materiales molidos y finos, derivados principalmente de biomásas agrarias y forestales. La producción de este biocombustible implica una valoración significativa de los residuos biomásicos, facilitando su manipulación, almacenamiento y transporte, y permitiendo su uso en instalaciones completamente automáticas. Los pellets exhiben diversas características físicas, destacando su forma y tamaño. Son generalmente cilíndricos, con un diámetro inferior a los 2,5 cm y longitudes variables, influenciadas por la matriz granuladora utilizada y la máquina peletizadora en sí. Su apariencia suele ser brillante, y su densidad varía según el material inicial y la presión aplicada durante el proceso de peletización. Con un tamaño relativamente pequeño, los pellets poseen una elevada potencia calorífica en comparación con leñas, astillas e incluso briquetas. En la mayoría de los

casos, presentan una mayor densidad energética, lo que los convierte en un producto de considerable interés comercial.

El proceso de compactación de la biomasa residual, específicamente bagazo de cacao, para la producción de pellets se ha abordado de la siguiente manera:

Aglomerantes y Proporciones. Tal como señala en la metodología, la aplicación de aglomerantes es indispensable para la compactación de la biomasa residual. Sin embargo, la introducción de aglutinante implica una etapa adicional de secado de los pellets, lo cual incrementa el consumo energético global del proceso. Por tanto, se realizan ensayos de compactación de la biomasa en las proporciones 90/10 %p/p, 80/20 %p/p y 70/30 %p/p, siendo la relación 70/30 %p/p la más funcional para la compactación del bagazo de cacao con almidón, usando los tamaños de partícula en estudio (250 micras y 500 micras)

Peletización del Bagazo de Cacao. Dado lo anterior, para una efectiva peletización del bagazo de cacao se confirma la necesidad de aglutinante, a pesar de que los tamaños de partícula sean inferiores a 1 mm y se mantengan humedades entre el 10% y 15 %p/p. Lo anterior representa un aumento del consumo energético asociado al secado de la biomasa previo proceso de peletización.

Rangos de Humedad y Tamaños de Partícula. Los estudios han indicado que los rangos de humedad óptimos para obtener una consistencia adecuada en los pellets oscilan entre el 10 y 15 %p/p (Ungureanu et al., 2018), usando estas mismas humedades para la compactación de la biomasa. La investigación actual se enfocó en evaluar tamaños de pellets entre 10 y 5 mm de diámetro, considerando que comercialmente se recomiendan valores entre 4.7 y 11.4 mm para la peletización de biomasa (Oberberger & Thek, 2004). Por ende se elaboran pellets de 5 mm, 7 mm y 10 mm, en los dos tamaños de partícula seleccionados (250 micras y 500 micras) y las dos humedades referencia (10% y 15%). Lo anterior con la finalidad de identificar si existe un impacto del tamaño de los pellets (diámetro) sobre la eficiencia del proceso de combustión (Syamsiro et al., 2012; Velazquez-Araque & Cárdenas, 2017).

Calcular Relación Másica del Bagazo Peletizado Sobre el Recibido. De acuerdo con los cálculos realizados para el bagazo correspondiente a la variedad Criolla, del 100% que ingresa al proceso de secado, triturado, tamizado y posterior peletización queda un total de 10% en peso de la biomasa, tal como lo demuestran los siguientes cálculos:

$$\text{Relación Másica (RM)} = \left(\frac{\text{Masa final}}{\text{Masa Inicial}} \right) \times 100$$

$$RM = \left(\frac{2740 \text{ Kg}}{27400 \text{ Kg}} \right) \times 100 = 10\%$$

Lo cual significa que por cada kilogramo de bagazo, 0.10 kilogramos (100 gramos) quedan peletizados, presentando una relación másica de 1:0.10 o 2:0.20.

En cuanto a la variedad FSV-1, del 100% que ingresa al proceso de secado, trituración, tamizado y posterior peletización queda un total de 8% en peso de la biomasa, tal como lo demuestran los siguientes cálculos:

$$\text{Relación Másica (RM)} = \left(\frac{\text{Masa final}}{\text{Masa Inicial}} \right) \times 100$$

$$RM = \left(\frac{2317 \text{ Kg}}{28957 \text{ Kg}} \right) \times 100 = 8\%$$

Lo cual significa que por cada kilogramo de bagazo 0.08 kilogramos (80 gramos) quedan peletizados, presentando una relación másica de 1:0.08 o 2:0.16.

Realizar Análisis Estructural de los Pellets. Al igual que con la biomasa particulada y tamizada, se realiza la determinación del contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa de la biomasa peletizada, obteniéndose los siguientes resultados para cada variedad:

Tabla 32.

Contenido de Lignina, Celulosa y Hemicelulosa de pellets de bagazo de cacao según variedad

Variedad	Lignina	Método	Holocelulosa	Método	Celulosa	Método	Hemicelulosa
Criolla	12,73%	Lignina Klason	13,57	Técnica de Browning	26,77%	Norma ANSI/AST M (1977b)	13,11%
FSV-1	8,31%	Lignina Klason	28,55	Técnica de Browning	41,93%	Norma ANSI/AST M (1977b)	13,23%

Nota: Elaboración del autor

Como se puede observar, el bagazo de cacao, presenta un cambio leve en los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa, sin mejorar en dichos aspectos sus rendimientos en cuanto a la eficiencia del proceso de compactación de la biomasa.

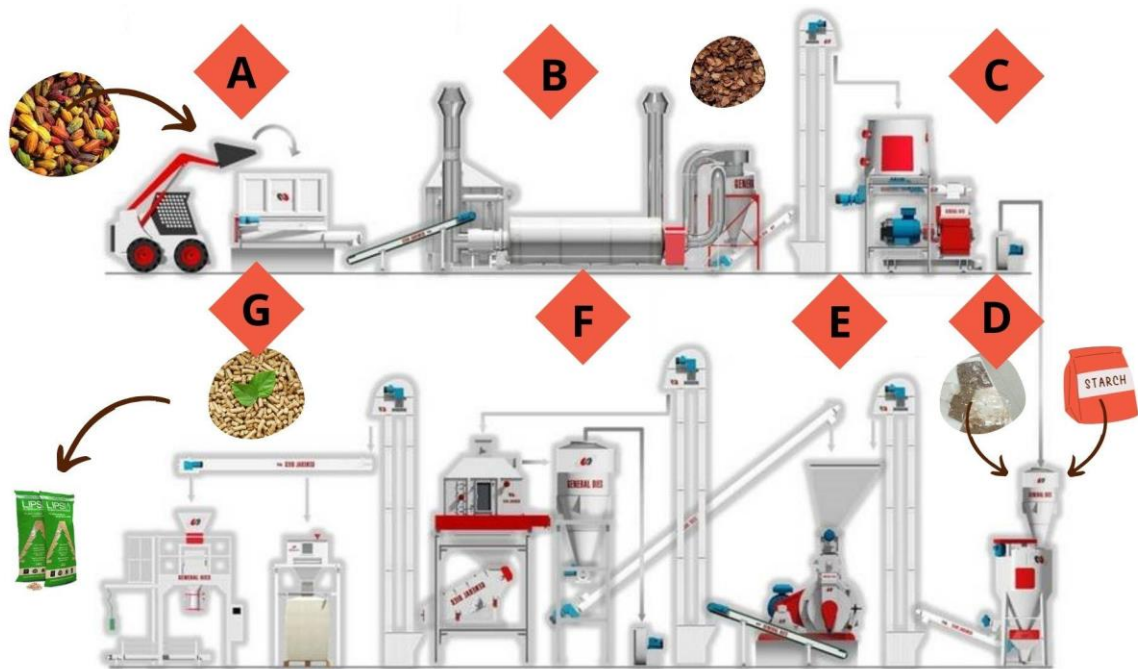
- **Envío de las muestras para su análisis elemental, próximo y PCS mediante bomba calorimétrica.** Finalmente, las muestras peletizadas son enviadas al laboratorio adjudicado para la determinación de su composición elemental, análisis próximo y de PCS. A partir de los resultados obtenidos se evaluará el aumento del PCS y PCI aplicando las *Fórmulas de Dulong*, para luego ser comparados con las mediciones experimentales obtenidas de la bomba calorimétrica, a fin de determinar, el aumento o mejora de sus propiedades energéticas.

Planteamiento del Esquema Tecnológico Para la Conversión del Bagazo de Cacao en Biocombustible.

La transformación de la cáscara de cacao en biocombustible sólido tipo pellet generalmente implica varias etapas, desde la recolección de la materia prima hasta la producción final de pellets. A continuación se describen las etapas propuestas desde el objetivo principal del proyecto, es decir, aumentando su ecoeficiencia:

Figura 13.

Esquema tecnológico para el transformación del bagazo de cacao en biocombustible tipo pellet



Nota: Elaboración del autor

Etapa A Recolección y Almacenamiento de Cáscara de Cacao. En esta fase, los residuos de cáscara de cacao son recolectados directamente de las instalaciones de procesamiento de cacao. Esto puede incluir plantas de procesamiento de granos de cacao, donde la cáscara es un subproducto o incluso fincas productoras de cacao. La recolección puede realizarse manualmente o mediante el uso de maquinaria especializada, como recolectores o aspiradoras de residuos agrícolas. La eficiencia y la calidad del material recolectado son cruciales para el éxito del proceso.

Después de la recolección, la cáscara de cacao debe ser transportada desde el lugar de recolección hasta la planta de peletización. El transporte puede llevarse a cabo mediante vehículos especializados, como camiones o transportadores, dependiendo de la distancia y la cantidad de material a transportar. Antes de ingresar al proceso de peletización, la cáscara de cacao puede requerir un almacenamiento temporal para garantizar un suministro continuo y eficiente a la planta de peletización. Se pueden utilizar áreas de almacenamiento específicas o silos temporales para garantizar que la cáscara esté disponible en la cantidad y momento adecuados para el proceso de transformación.

La cáscara de cacao recolectada puede contener impurezas o humedad que deben eliminarse antes del proceso de peletización. Operaciones como la limpieza y el secado pueden realizarse para mejorar la calidad del material y garantizar un proceso de peletización eficiente. Es importante señalar que la eficiencia en esta etapa del proceso es crucial para obtener un producto final de alta calidad. Un manejo adecuado de la cáscara de cacao desde la recolección hasta la planta de peletización contribuirá a la eficiencia y sostenibilidad de la cadena de producción de biocombustibles tipo pellet a partir del bagazo de cacao.

Etapa B Secado de la Cáscara de Cacao. La transformación del bagazo de cacao en biocombustible tipo pellet implica el proceso de eliminación de la humedad presente en la cáscara de cacao recolectada. Un contenido de humedad adecuado es esencial para lograr un producto final de alta calidad durante el proceso de peletización. Después de la preparación, la cáscara de cacao se transporta a la zona de secado. El transporte puede realizarse mediante sistemas de cintas transportadoras u otros medios, dependiendo de la infraestructura y el diseño de la planta.

Paso seguido se realiza el proceso de secado, el cual implica la eliminación controlada de la humedad presente en la cáscara de cacao para alcanzar un nivel de contenido de humedad adecuado para el proceso de peletización (10% - 15%). Se utilizan equipos de secado, como secadores rotativos o lechos fluidizados, que aplican calor controlado para evaporar la humedad de la cáscara. La temperatura y el tiempo de exposición se ajustan para lograr el contenido de humedad deseado (Tabla 18). Durante el proceso de secado, es esencial monitorear y controlar parámetros como la temperatura y la humedad para garantizar que la cáscara alcance el nivel de secado óptimo. Sensores y sistemas de control automático son utilizados para monitorear y ajustar las condiciones de secado en tiempo real.

Una vez que la cáscara de cacao ha alcanzado el nivel de secado deseado, se almacena temporalmente antes de ingresar al proceso de peletización. Se pueden utilizar silos u otras áreas de almacenamiento específicas que preserven las condiciones de secado y eviten la absorción de humedad del entorno.

Etapas C Trituración y Reducción de Tamaño. Esta etapa se refiere al proceso de reducir las partículas de cáscara de cacao a un tamaño adecuado antes de entrar en el proceso de peletización, también denominada Molienda. La cáscara de cacao, después de la etapa de secado, puede contener partículas de diversos tamaños. La preparación del material implica asegurarse de que la cáscara esté lista para el proceso de trituración. Se pueden utilizar equipos de clasificación para separar partículas grandes o materiales no deseados antes de la trituración.

La cáscara de cacao se somete a una trituración inicial para reducir su tamaño a dimensiones más manejables antes de pasar al siguiente paso. Se emplean trituradoras primarias, que pueden ser de tipo martillo, cuchillas o de rodillos, dependiendo de la configuración de la planta y la naturaleza del material.

Después de la trituración primaria, las partículas resultantes se someten a una etapa adicional de reducción de tamaño para alcanzar las dimensiones específicas requeridas para el proceso de peletización. Equipos como molinos de martillos, molinos de cuchillas o molinos de rodillos pueden utilizarse para obtener un tamaño de partícula más fino y uniforme.

Para garantizar la uniformidad del tamaño de las partículas, se puede realizar un proceso de tamizado o clasificación para separar las partículas según su tamaño. En esta etapa es importante resaltar que tamaños de partícula por debajo de 1 mm, garantizan un mejor comportamiento en procesos de combustión. En este sentido, se pueden emplear los tamaños de partícula referenciados en la presente investigación (250 micras - 500 micras). Para este proceso se utilizan tamices o clasificadores para separar las partículas trituradas en fracciones de tamaño específicas, asegurando que solo las partículas de tamaño deseado ingresen al proceso de peletización.

Una vez completada la reducción de tamaño, las partículas trituradas se pueden almacenar temporalmente antes de ingresar al proceso de peletización. Se pueden utilizar silos u otras instalaciones de almacenamiento para garantizar un suministro constante y continuo al proceso de peletización.

Etapas D Mezcla y Homogeneización. Implica la preparación de una mezcla homogénea y uniforme de los materiales triturados antes de ingresar al proceso de peletización. Los materiales triturados, provenientes de la etapa de trituración y reducción de tamaño, son alimentados al sistema de mezcla. Equipos de transporte como transportadores de tornillo o bandas transportadoras pueden utilizarse para llevar las partículas trituradas al área de mezcla.

En esta fase, los diferentes componentes de la mezcla, que pueden incluir la cáscara de cacao triturada y, en algunos casos, aditivos o aglutinantes, son combinados para formar una mezcla homogénea. Se utilizan mezcladores específicos, como mezcladores de paletas, mezcladores de tambor o mezcladores de cinta, que agitan y mezclan los materiales de manera efectiva. En algunos casos, se pueden añadir aglutinantes o aditivos a la mezcla para mejorar las propiedades de los pellets resultantes. La elección del aglomerante dependerá de sus propiedades químicas y por supuesto, costos asociados. La adición de estos materiales puede realizarse mediante sistemas automáticos o dosificadores, asegurando una distribución uniforme en la mezcla.

La homogeneización por su parte implica asegurar que la mezcla tenga una composición uniforme y que todos los componentes estén distribuidos de manera equitativa. El proceso de homogeneización puede involucrar la agitación continua y controlada de la mezcla en el mezclador, garantizando que cada partícula esté en contacto con todos los demás componentes para lograr una uniformidad adecuada.

Durante la mezcla, se lleva a cabo un control continuo de los parámetros clave, como la velocidad de mezcla, el tiempo de mezcla y la adición de cualquier aglutinante o aditivo. Sistemas de control automatizado pueden utilizarse para supervisar y ajustar los parámetros en tiempo real, garantizando la consistencia y calidad de la mezcla.

Etapa E Prensado y Compactación. Implica la formación de pellets a partir de la mezcla homogénea de materiales preparados. La mezcla homogénea, preparada en la etapa de mezcla y homogeneización, es alimentada al sistema de peletización para dar inicio al proceso de formación de pellets. El transporte de la mezcla hacia la máquina peletizadora puede realizarse mediante sistemas de alimentación controlados para mantener un flujo constante y uniforme.

La mezcla es sometida a un proceso de prensado inicial en el que se aplica presión para formar material compactado preliminar. Una matriz o dado en la máquina peletizadora se utiliza para aplicar presión a la mezcla. Esto comienza a dar forma a las partículas y a comprimir el material. La mezcla compactada es sometida a un proceso de compactación y extrusión, donde la presión se incrementa para forzar la salida del material a través de orificios en la matriz. La matriz de la peletizadora contiene orificios a través de los cuales la mezcla es extraída bajo alta presión, formando cilindros o columnas de material que se cortan a la longitud deseada.

Los cilindros extraídos son cortados a longitudes específicas, creando así pellets individuales. Cuchillas o dispositivos de corte integrados en la máquina peletizadora cortan los cilindros en pellets del tamaño deseado.

Etapa F Enfriamiento y Tamizado. Después de la formación, Los pellets pueden estar a una temperatura elevada debido al proceso de peletización, POR TANTO es importante enfriarlos para evitar deformaciones y mejorar su durabilidad. Pueden utilizarse sistemas de enfriamiento por convección, donde se hace circular aire a temperatura ambiente alrededor de los pellets, o sistemas de refrigeración, que pueden implicar el uso de equipos de refrigeración o intercambiadores de calor.

Así mismo pueden pasar por un proceso de tamizado para eliminar partículas finas o polvo que puedan haberse formado durante la peletización. Normalmente se utilizan tamices vibratorios que separan los pellets de tamaño adecuado de las partículas más pequeñas. Esto asegura que solo los pellets de calidad avancen al siguiente paso del proceso. El transporte puede realizarse mediante sistemas de cintas transportadoras o equipos similares, llevando los pellets desde la máquina peletizadora a la zona de enfriamiento.

Etapa G Almacenamiento y Empaque. Después de la formación, enfriamiento y tamizado, los pellets se trasladan a áreas de almacenamiento temporal antes de su empaque final. Se utilizan instalaciones de almacenamiento, como silos o contenedores, para mantener los pellets en condiciones controladas antes de pasar a la fase de empaque.

Antes de empaquetar, los pellets pueden someterse a una inspección de calidad para asegurar que cumplen con los estándares y especificaciones requeridos. Se pueden realizar controles visuales o análisis de muestra para verificar la uniformidad, tamaño, humedad y otros parámetros de calidad.

Los pellets son empaquetados en unidades específicas para facilitar su manejo, transporte y almacenamiento. Actualmente se comercializan a granel (siempre y cuando el consumo de pellets represente importantes cantidades, con lo que eso supone de disminución de precios, y generalmente para instalaciones que demanden mucha energía térmica) y en sacos de plástico desde 15 kg hasta 35 kg (generalmente para estufas compactas en viviendas unifamiliares, y es el pellet con más precio debido a la calidad del mismo). Se utilizan máquinas empacadoras automáticas o sistemas manuales para llenar bolsas, contenedores o sacos con la cantidad deseada de pellets. El empaque puede ser en bolsas de plástico, sacos de papel u otros materiales adecuados.

Una vez que los pellets están empaquetados, se sellan los envases para preservar la calidad del producto y se aplican etiquetas con información relevante. Máquinas selladoras y sistemas de etiquetado automático pueden utilizarse para agilizar este proceso, asegurando la integridad y trazabilidad del producto.

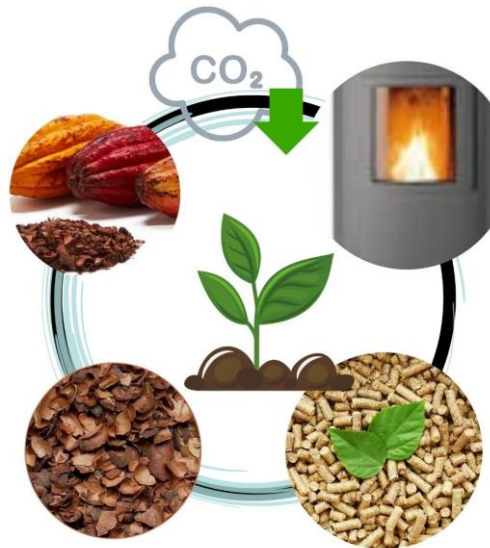
Los paquetes sellados y etiquetados se almacenan en un área final de almacenamiento antes de su distribución o uso. Se pueden utilizar áreas específicas de almacenamiento, como almacenes, para mantener los productos finales en condiciones controladas y listos para su envío.

Distribución y Uso. Los productos empaquetados son distribuidos y transportados a los clientes, consumidores o lugares de uso. Se utilizan camiones, barcas u otros medios de transporte para llevar los paquetes de pellets a su destino final. Esta etapa implica la planificación logística, carga eficiente de pellets empaquetados, monitoreo de condiciones durante el transporte, descarga en puntos de destino, almacenamiento temporal si es necesario, distribución a usuarios finales y seguimiento detallado de las entregas.

Consideraciones Ambientales. La producción de biocombustible tipo pellet a partir del bagazo de cacao implica diversas consideraciones ambientales para asegurar la sostenibilidad y minimizar el impacto ambiental. Entre ellas:

Figura 14.

Ciclo de aprovechamiento del bagazo de cacao como biocombustible



Nota: Elaboración del autor

- Seleccionar materias primas, como el bagazo de cacao, de manera sostenible para garantizar que la producción no contribuya a la deforestación o a prácticas agrícolas no sostenibles.
- La eficiencia energética en todas las etapas del proceso de producción, desde la trituración hasta el envasado, ayuda a reducir la huella de carbono de la producción de biocombustibles.
- La gestión adecuada de los residuos generados durante el proceso, como los restos de corte y tamizado, es esencial para prevenir la contaminación y promover la sostenibilidad.
- El uso eficiente del agua en las operaciones de producción minimiza el impacto en los recursos hídricos locales.
- La obtención de certificaciones ambientales reconocidas puede confirmar que la producción cumple con estándares ambientales establecidos.
- La minimización de emisiones atmosféricas, incluyendo gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos, es crucial para reducir el impacto climático.
- La realización de un análisis del ciclo de vida evalúa el impacto ambiental de principio a fin, desde la obtención de materias primas hasta la disposición final.

Este esquema tecnológico puede variar según la escala de producción y los recursos disponibles. Además, es importante cumplir con las regulaciones ambientales y de calidad del combustible.

Análisis Costo - Beneficio del Aprovechamiento del Bagazo de Cacao Como Biocombustible de uso en la Cadena de Valor Energética Industrial.

A nivel de Latinoamérica el uso de biocombustibles a base de pellets todavía no está tan extendido como en otros países europeos. Esto se comprueba con el número de empresas pelletizadoras registradas según la Bioenergy International. Nada más en España, la capacidad instalada ronda las 900.000 toneladas anuales, repartidas entre las 50 plantas activas a día de hoy. Sin embargo, las biomásas residuales tratadas corresponden principalmente a residuos forestales, maderables y no maderables (Bioenergy Internacional, 2018). En cuanto al uso de la cáscara o bagazo de cacao como biocombustible pelletizado, aún no se encuentran desarrollos comerciales específicos, por tanto, a continuación citamos productos similares y que se convierten en un punto de referencia para el biocombustible de interés a desarrollar:

Pellets Ecomas S.A. Ecomas es una empresa chilena que desde el año 2006 se dedica a la producción y comercialización de pellet premium de madera, utilizando exclusivamente subproductos libres de contaminantes provenientes de la industria re-manufacturera forestal.

Figura 15.
Bolsa Pellets ECOMAS



Nota: Presentación empaque de pellets de 15 Kg. Ecomas (2023)

De acuerdo con lo recopilado en su página web, Ecomas comercializa pellets de alta calidad, específicamente de *Pino radiata*. La madera empleada para la elaboración del pellet no tiene aditivos ni impurezas. El producto final presenta un excelente estado de compactación, humedades entre el 6% al 8%, por lo que en procesos de combustión genera menor cantidad de residuos (cenizas), prolongando la vida útil y buen funcionamiento de los equipos de combustión, asegurando de esta manera una alta eficiencia y baja emisión de material particulado al ambiente. La empresa anualmente renueva y obtiene la certificación de calidad europea ENPLUS, certificadora mundial de pellets de madera de alta calidad. Actualmente, el producto se comercializa en Bolsas de 15 kilogramos con precio de \$4.850 (21.818 COP) pesos chilenos por bolsa adquirida.

Pellets Lipsia. Lipsia es una empresa Argentina fundada en 1936 en Buenos Aires. Desde los años 60 empieza una reestructuración con enfoque forestal, y actualmente, es proveedor de soluciones bioenergéticas, entre ellas, la conversión del principal subproducto de la industria maderera, el aserrín y viruta en pellet. Al igual que Ecomas, el pellet producido por Lipsia, posee un bajo contenido de humedad (<10%) y un elevado poder calorífico (4800 Kcal/Kg). Por su reducido tamaño y su forma cilíndrica, permite ser dosificado a través de sistemas mecánicos o neumáticos. Genera menos ceniza que la leña (<0,4%) y se comercializa en longitudes entre 5.59 mm a 45.85 mm. Uno de los principales usos es para la calefacción de los hogares.

Figura 16.
Bolsa Pellets LIPSIA



Nota: Presentación empaque de pellets de 15 Kg. LIPSIA (2023)

El producto también cuenta con la certificación de calidad europea ENPLUS, y se distribuye en pacas de 15 kilogramos.

Pellet Bruciabene. Desde el año 2002 la división Energy de Silvateam, produce y comercializa pellets bajo la marca Bruciabene, vendiéndolos en presentaciones comerciales de 15 kilogramos para su fácil transporte y almacenamiento, utilizados principalmente en actividades domésticas como combustible natural para estufas y calderas de Italia.

Sin embargo, la empresa también comercializa en big bags y a granel en camiones, de capacidades entre 10 a 12 Kilogramos y hasta 80 Kilogramos, para su uso en calderas y centrales térmicas. La presentación comercial del pellet es en diámetros de 6 mm, con una humedad <8,0%, baja generación de cenizas en procesos de combustión (<0,4%) y un poder calorífico superior a 18,5 MJ/Kg de biomasa. Su durabilidad mecánica es mayor al 97,8%. El pellet se obtiene principalmente de la madera residual de castaño, de la extracción de los taninos, libre de aditivos químicos, blanqueantes y aglutinantes.

Con base en el planteamiento del esquema tecnológico se realiza el análisis costo - beneficio:

La puesta en marcha de UNA propuesta de negocio precisa determinar los criterios financieros que afectarán la viabilidad de su desarrollo, es por esto, que a partir del estudio técnico se genera información trascendental para la elaboración del presupuesto de ingresos y egresos que en su objetivo, una planta de producción de pellets de biocombustible tendrá que afrontar en los próximos 5 años, período en el que se proyecta que el negocio llegue a su etapa de estabilidad financiera.

Dado lo anterior, se debe establecer un límite de producción diaria, para la presente investigación se escoge la producción de una tonelada/día. Iniciamos con la proyección de los indicadores macroeconómicos en el País, a fin de tener los valores ajustados año a año de acuerdo con el comportamiento del IPC y el IPP:

Tabla 33.*Proyección del IPC y el IPP 2023 - 2024*

Criterio	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Variación IPC	3,82	3,74%	3,85%	3,96%	4,08%	4,19%
Índice de Precios al Productor	120,35	122,84	126,29	129,74	133,19	136,65
Variación IPP	2,98%	2,90%	2,81%	2,73%	2,66%	2,60%

Nota: Elaboración del autor

Costos de producción. Hace referencia a los gastos necesarios para el mantenimiento del proyecto. Estos se encuentran distribuidos en gastos por materias primas e insumos, mano de obra, servicios públicos, gastos por intereses y gastos administrativos. A continuación se presenta la proyección en costos de producción según los gastos asociados a la producción de una tonelada del biocombustible:

Estudio de ingeniería del proyecto. En el presente apartado, se presentan los aspectos relacionados con salarios, materiales e insumos, tecnología y equipos, así como los recursos humanos necesarios para la ejecución de la propuesta de negocio. Para la proyección de estos datos se emplearon fuentes secundarias de información, tales como los boletines de indicadores macroeconómicos, resultados históricos de la Encuesta Anual Manufacturera - DANE, bases de datos del observatorio laboral y ocupacional del SENA y de la SNIES, entre otros, a fin de obtener la información relevante y suficiente para el desarrollo del estudio.

Tabla 34.*Proyección del recurso humano necesario para la ejecución de la propuesta de negocio*

Cargo	Recurso humano estimado por período				
	1	2	3	4	5
Operarios	1	1	1	1	1
Secretarias	1	1	1	1	1
Aseo y servicios generales	1	1	1	1	1
Contador	1	1	1	1	1
Total de empleos generados	4	4	4	4	4

Nota: Elaboración del autor

Tabla 35.*Asignación salarial por mano de obra necesaria*

Personal	Asignación Laboral
Operarios	1.200.000
Secretarias	1.160.000
Aseo y servicios generales	1.160.000

Contador	1.800.000
----------	-----------

Nota: Elaboración del autor

Proyección de los salarios a pagar por recurso humano para la ejecución de la propuesta de negocio. El costo por mano obra se obtiene a partir del valor de los salarios propuestos para el período 1, y la proyección de los mismos se realiza a partir del IPC obtenido de la base de datos históricos del DANE. Cada salario cuenta con el respectivo ajuste por carga prestacional para el año en curso (2023), obteniendo de esta manera la proyección de la nómina del proyecto, así:

Tabla 36.

Proyección salarial por mano de obra necesaria

Cargo	Salario Estimado Por Período				
	1	2	3	4	5
Operarios	1200000	1272000	1348320	1429219,2	1514972,352
Secretarias	1160000	1229600	1303376	1381578,56	1464473,274
Aseo y servicios generales	1160000	1229600	1303376	1381578,56	1464473,274
Contador	1800000	1908000	2022480	2143828,8	2272458,528
Total mensual	5320001	5639202	5977555	6336209,12	6716382,427
Total Anual	63840012	67670424	71730660	76034509,44	80596589,13

Nota: Elaboración del autor

Materiales e Insumos. Hace referencia a las materias primas y herramientas menores que se necesitarán para la ejecución de la propuesta de negocio. A continuación se detallan:

Tabla 37.

Materias primas e insumos necesarios para la ejecución de la propuesta de negocio

Detalle	Presentación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Almidón	Kilogramo	72000	15.000	1.080.000.000
Guantes de carnaza	Par	4	25.000	100.000
Costales	Unidad	16080	2.000	32.160.000
Gafas de seguridad	Unidad	4	25.000	100.000
Indumentaria	Unidad	1	225.000	225.000

Inversión Total	1.113.195.000
------------------------	----------------------

Nota: Elaboración del autor

Tabla 38.

Herramientas menores necesarias para la ejecución de la propuesta de negocio

Detalle	Presentación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Martillos	Unidad	2	55.000	110.000
Pala	Unidad	4	40.000	160.000
Carro de carga	Unidad	1	450.000	450.000
Juegos de destornilladores	Unidad	1	36.000	36.000
Alicates	Unidad	2	31.450	62.900
Juego de pinzas	Unidad	1	17.900	17.900
Taladros inalámbricos	Unidad	1	650.000	650.000
Taladros percutores	Unidad	1	560.000	560.000
Juego de formoles	Unidad	1	190.000	190.000
Juego de cinceles	Unidad	1	125.000	125.000
Cepillos manuales	Unidad	2	87.000	174.000
Hombre solos	Unidad	2	35.000	70.000
Juego de llaves	Unidad	1	160.000	160.000
Inversión Total				2.155.800

Nota: Elaboración del autor

Tecnología y Equipos. Hace referencia al equipo de cómputo y herramientas mayores necesarias para la ejecución de la propuesta de negocio. A continuación se detallan:

Tabla 39.

Herramientas mayores necesarias para la ejecución de la propuesta de negocio

Detalle	Presentación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Caldera	Unidad	1	39.802.500	39.802.500
Horno industrial	Unidad	1	25.901.250	19.901.250

Bandas transportadoras	Unidad	1	3.980.250	3.980.250
Trituradora	Unidad	1	29.802.500	39.802.500
Mezcladora	Unidad	1	4.980.250	3.980.250
Peletizadora	Unidad	1	19.901.250	19.901.250
Sistema de Refrigeración	Unidad	1	25.802.500	39.802.500
Tamiz Vibratorio	Unidad	1	7.960.500	7.960.500
Máquina de empaque	Unidad	1	15.901.250	15.901.250
Equipo de soldadura	Unidad	1	3.200.000	3.200.000
Computadores	Unidad	1	2.850.000	2.850.000
Mobiliario de oficina: sillas, escritorios, archivadores, estantes, etc	Unidad		9.400.000	9.400.000
Inversión Total				189.482.250

Nota: Elaboración del autor

Obras Físicas. Para el establecimiento de la empresa, debe destinarse un lugar o espacio apropiado, contando con las dimensiones suficientes para el desarrollo inicial de la organización, para la ubicación de la planta de producción o fabricación de pellets, y ubicación de las oficinas para la atención de clientes y proveedores.

Para la adecuación de las áreas necesarias para la atención de clientes y ubicación de la planta de producción, se deberán realizar ajustes a la infraestructura, definidos principalmente en la instalación y adecuación de paredes que permitan dividir dichas áreas; así mismo, la instalación y distribución de la red de energía eléctrica, y las complementarias para la red de servicios de internet y teléfono. Todas estas actividades, suponen de igual forma, la necesidad de inversión para su desarrollo, detalladas a continuación:

Tabla 40.

Obras físicas para la adecuación de la bodega donde se instalará la empresa

Obras físicas	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Instalación de paredes DRY WALL	230 m ²	1	5.200.000	5.200.000
Pintura de paredes	230 m ²	1	670.400	670.400
Adecuación de la red de energía eléctrica	230 m ²	1	2.350.000	2.350.000
Instalación de red para telefonía e internet	230 m ²	1	1.250.000	1.250.000
Inversión Total				9.470.400

Nota: Elaboración del autor

Como se puede observar, los costos asociados a la producción anual de biocombustible tipo pellet a partir del bagazo de cacao son de \$1.112.585.000 pesos, distribuidos en los diferentes materiales, insumos y herramientas especificados en los cuadros anteriores. Se asume una inversión inicial de capital de \$201.718.450 pesos, correspondiente a herramientas menores, infraestructura, tecnología y equipos. Para realizar la proyección de costos se toma la producción de una tonelada al día, la cual dividida en empaques de 15 kg, se obtendría una producción diaria de 67 pacas de

biocombustible, representando al año una producción total de 24120 pacas. Partiendo de estos datos, se realiza la proyección de costos empleando el IPP e IPC:

Tabla 41.

Proyección de los costos de producción para los períodos 2023 - 2028

Artículo	Período	Costos de producción	Cantidad proyectada
Paca de Biocombustible 15 kg	2023	1.193.181.589	24120
Paca de Biocombustible 15 kg	2.024	1.227.783.855	25022,088
Paca de Biocombustible 15 kg	2.025	1.262.284.582	25985,43839
Paca de Biocombustible 15 kg	2.026	1.296.744.951	27014,46175
Paca de Biocombustible 15 kg	2.027	1.331.238.366	28116,65179
Paca de Biocombustible 15 kg	2.028	1.365.850.564	29294,7395

Nota: Elaboración del autor

Servicios Públicos. Para los servicios públicos se toma de igual manera el IPC proyectado por año y se multiplica por 15% que equivale al porcentaje estimado de incremento de acuerdo a la producción anual.

Tabla 42.

Proyección de gastos por servicios públicos para los períodos 2024 - 2028.

Servicio	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Energía eléctrica	4.200.000	4.360.440	4.527.009	4.699.941	4.879.478
Acueducto, alcantarillado y residuos	2.940.000	3.052.308	3.168.906	3.289.958	3.415.635
Gas	450.000	467.190	485.037	503.565	522.801
Internet y telefonía	2.280.000	2.367.096	2.457.519	2.551.396	2.648.860
Totales	9.870.000	10.247.034	10.638.471	11.044.860	11.466.774

Nota: Elaboración del autor

Gastos administrativos. Corresponde a la papelería necesaria, elementos de aseo y cafetería.

Tabla 43.

Proyección de gastos administrativos para los períodos 2024 - 2028.

Detalle	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
---------	-------	-------	-------	-------	-------

Papelería	2.720.000	2823904	2931777	3043771	3160043
Elementos de aseo y cafetería	3.480.000	3612936	3750950	3894236	4042996
Publicidad	3.000.000	4.146.000	5.729.772	7.918.545	10.943.429
Totales	9.200.000	10.582.840	12.412.499	14.856.552	18.146.468

Nota: Elaboración del autor

Depreciación. Se calculó la depreciación para los siguientes elementos: muebles y enseres, equipos de oficina y maquinaria.

Tabla 44.

Proyección de la depreciación para los períodos 2024 - 2028.

Detalle	Depreciación a 5 años
Muebles y enseres	1.000.000
Equipos de oficina	300.000
Maquinaria	19.000.000
Herramienta	500.000
Total 5 AÑOS	20.800.000
Depreciación anual	4.160.000

Nota: Elaboración del autor

Ingresos. Hace referencia a los ingresos obtenidos por ventas de los productos generados por el proyecto de negocio, pronosticando un incremento anual del 25% a partir del segundo año de producción y tomando el IPC proyectado para este año, el cual equivale al 3.82%. De acuerdo con los costos de producción obtenidos se plantea la venta de la paca de 15 kg en un precio mínimo de competencia por \$50.000 pesos.

Tabla 45.

Proyección de ingresos obtenidos por la venta del producto final para los períodos 2023 - 2028

Artículo	Período	Precio de venta	Cantidad proyectada	Total
Paca de Biocombustible 15 kg	2023	50.000	24120	1.205.989.309,13
Paca de Biocombustible 15 kg	2.024	51.870	25022,088	1.297.884.199,06

Paca de Biocombustible 15 kg	2.025	53.867	25985,43839	1.399.745.071,24
Paca de Biocombustible 15 kg	2.026	56.000	27014,46175	1.512.799.905,11
Paca de Biocombustible 15 kg	2.027	58.284	28116,65179	1.638.762.644,60
Paca de Biocombustible 15 kg	2.028	60.727	29294,7395	1.778.967.982,30

Nota: Elaboración del autor

Cálculo del valor presente neto VPN. A partir de los datos obtenidos en el estudio anterior, se procede a realizar el flujo de caja general y proyectado para los próximos cinco años.

Tabla 46.*Flujo de Caja Proyectado*

Detalle	Año 0	2024	2025	2026	2027	2028
Ventas		1.297.884.199,06	1.399.745.071,24	1.512.799.905,11	1.638.762.644,60	1.778.967.982,30
(-) Costos Variables		1.227.783.855	1.262.284.582	1.296.744.951	1.331.238.366	1.365.850.564
Costos De Producción		1.227.783.855	1.262.284.582	1.296.744.951	1.331.238.366	1.365.850.564
(-) Costos Fijos		19.070.000	20.829.874	23.050.970	25.901.412	29.613.242
Servicios Públicos		9.870.000	10.247.034	10.638.471	11.044.860	11.466.774
Gastos Administrativos		9.200.000	10.582.840	12.412.499	14.856.552	18.146.468
(-) Sueldos Y Salarios		63.840.012	67.670.424	71.730.660	76.034.509	80.596.589
(-) Depreciaciones		4160000	4160000	4160000	4160000	4160000
(-) Gastos Financieros		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(=) Utilidad Antes De Impuestos	-	-16.969.668,16	44.800.191,69	117.113.324,49	201.428.356,86	298.747.587,35
35% Impuesto A La Renta		-5939383,855	15680067,09	40989663,57	70499924,9	104561655,6
(=) Utilidad Después De Impuestos	-	-11.030.284,30	29.120.124,60	76.123.660,92	130.928.431,96	194.185.931,78
(+) Depreciaciones		4160000	4160000	4160000	4160000	4160000
(-) Inversiones Iniciales	0					
(-) Inversiones En Capital De Trabajo	-201.718.450					
(+) Valor Residual						4.160.000

(+) Recuperación Capital De Trabajo		-194.848.165,70	-161.568.041,10	-81.284.380,18	53.804.051,78	256.309.983,55
(=) Flujo Efectivo Neto	-201.718.450	-6.870.284,30	33.280.124,60	80.283.660,92	135.088.431,96	202.505.931,78
Flujo De Ingresos		1.297.884.199,06	1.399.745.071,24	1.512.799.905,11	1.638.762.644,60	1.778.967.982,30
Flujo De Egresos		1.304.754.483,36	1.366.464.946,64	1.432.516.244,19	1.503.674.212,64	1.576.462.050,53
Sumatoria Del Flujo	444.287.864,95					

Nota: Elaboración del autor

Tabla 47.

Indicadores de evaluación financiera

Años	Flujos De Efectivo	Vp	Tasa De Interés	10,32%
0	-201.718.450	-\$ 201.718.450,00		
1	-6.870.284,30	-\$ 6.227.596,36		
2	33.280.124,60	\$ 27.344.906,16		
3	80.283.660,92	\$ 59.794.936,43		
4	135.088.431,96	\$ 91.201.325,00		
5	202.505.931,78	\$ 123.927.156,00		
Valor presente Neto (VPN):		\$ 94.322.277,23		
Tasa Interna de Retorno (TIR):		21%		
Tiempo de Recuperación de la inversión (AÑOS)		3		

Nota: Elaboración del autor

Análisis del riesgo del proyecto. El análisis financiero de los flujos de efectivo obtenidos, arrojaron que el proyecto planteado es totalmente viable, teniendo en cuenta que la recuperación de la inversión inicial se da en el tercer año, para lo cual, según estos indicadores, cuando la recuperación de la inversión es mayor a tres años y menor a ocho años, se puede decir que la inversión es aceptable en términos económicos y que la propuesta de negocio es viable. Finalmente, en cuanto al indicador evaluado mediante la tasa interna de retorno TIR, que equivale al 21% del plan de negocio, se concluye que esta sería más que correcta para los inversionistas, determinando el indicador que la inversión en términos económicos es aceptable.

De esta manera se confirma que el biocombustible tipo pellet fabricado a partir del aprovechamiento de la cáscara de cacao compite en el mercado de dos maneras, primero por el contenido de PCI:

Tabla 48.

Poder calorífico de pellets de biomasa forestales versus Biocacaenergy


Pellet	Poder calorífico
Ecomas	17,28 MJ/kg peletizado
Lipsia	19,23 MJ/Kg peletizado
Bruciabene	18,5 MJ/KG peletizado
Biocacaoenergy FSV-1	18,88 Mj/kg sin peletizar
Biocacaoenergy Criollo	19,22 Mj/kg sin peletizar

Nota: Elaboración del autor


En segunda medida por precio según productos similares vendidos en el mercado colombiano:

Tabla 49.

Precios de productos ecológicas elaborados a partir de biomasa residuales

	Carbón de Café
	1.5 Kilos
	\$23.000
	https://lenoslacolina.com/carbon-de-cafe/
	Venta de Briquetas de carbón vegetal

	Caja x 12 unidades
	\$17.400
	https://laleneria.com/briquetas-de-carbon-vegetal/?gclid=Cj0KCCQiAyeWrBhDDARIsAGP1mWRGAlzQU3Zr52AjC0BlcScElmGWCNf3glDKpxwuAZedNZ7AnE6OWZkaAn5nEALw_wcB

	Carbón Vegetal Bulto Al Detal
	20 kg aproximadamente
	\$65450
	https://laleneria.com/carbon-vegetal-bulto-al-detal/

Nota: Elaboración del autor

De acuerdo con el mercado internacional, el producto elaborado en pacas de 15 kg tendría un costo superior, siendo 50% más costoso que el precio promedio en que se vende a nivel internacional (\$31,000) (FEDEMADERAS, 2023; E-eficiencia, 2023). Ahora bien, se realiza la proyección asumiendo una producción diaria de 1 tonelada como mínimo, sin embargo, la inversión realizada en tecnología para el procesamiento de la biomasa, presenta precios promedios para la producción de más de una tonelada al día de pellet, por lo que, al aumentar las cantidades de pacas producidas y vendidas al día, se disminuye su precio comercial, dado que en el costo de producción proyectado se suma el valor por mano de obra, la cual no variará si la planta aumenta su producción a 3 toneladas diarias.

Promoción del aprovechamiento del bagazo de cacao como biocombustible. Como actividad final del proyecto de investigación, se realizó la transferencia tecnológica participando del evento XI Versión Redes Unidas Para el Conocimiento, realizado los días 28 y 29 de noviembre de 2023 en el Centro Industrial y del Desarrollo Tecnológico, SENA Barrancabermeja. El proyecto fue aceptado para ser presentado mediante STAND en el *III Encuentro de Semillas Solacyt Nodo Magdalena Medio y Clasificadorio a Infomatrix Sudamérica Colombia*, ocupando el cuarto puesto de la competencia, recibiendo un cupo para ser presentado en la competencia nacional de la infomatrix colombia 2024.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio revelan diferencias significativas entre las variedades criolla (amarilla) y FSV-1 (roja) en términos de masa de las mazorcas, rendimientos de extracción y características de secado, lo cual tiene implicaciones directas en la viabilidad de transformar el bagazo de cacao en biocombustible tipo pellet. En cuanto a la masa inicial de las mazorcas, la variedad criolla demostró ser más pesada (0,644 kg) en comparación con la FSV-1 (0,607 kg). Esta diferencia en masa se reflejó también en el bagazo extraído, donde la variedad criolla produjo un bagazo más pesado (0,434 kg) en comparación con la FSV-1 (0,384 kg). Sin embargo, la variabilidad en la humedad durante el secado natural y forzado afectó la composición y el rendimiento final de las muestras.

En términos de composición química, las variedades mostraron diferencias notables. La variedad criolla presentó contenidos de lignina (12,13%), holocelulosa (13,26%), celulosa (26,07%), y hemicelulosa (12,81%) menores en comparación con la FSV-1 (Lignina 8,21%, Holocelulosa 28,55%, Celulosa 41,73%, Hemicelulosa 13,18%). Estas diferencias podrían afectar la eficiencia de la compactación y la calidad del pellet resultante. Los resultados calorimétricos indican que el Poder Calorífico Superior (PCS) y el Poder Calorífico Inferior (PCI) fueron mayores para la variedad FSV-1 en comparación con la CRIOLLA. Se determinó un promedio de PCS y PCI para el bagazo CRIOLLO de 19,73 Mj/kg y 18,88 Mj/kg respectivamente; y para el bagazo FSV-1 del 20,15 Mj/kg y 19,22 Mj/kg de PCS y PCI respectivamente. Estas diferencias son esenciales para evaluar la eficiencia energética y la calidad del biocombustible producido.

La comparación con estudios internacionales, específicamente en Ecuador, destaca un aumento notable del PCI al peletizar la cáscara de cacao, evidenciando la eficacia de este proceso y resaltando la relevancia de considerar la densidad energética al evaluar biomasa peletizada. Los resultados arrojaron que el PCI de la cáscara de cacao en estado particulado producida en Santander es mayor. En términos de proceso, el esquema tecnológico para la conversión del bagazo de cacao en biocombustible tipo pellet involucra varias etapas. Después de la extracción de la masa de las mazorcas, se procede al secado natural y/o forzado, donde se observó que la variedad criolla requiere 9 horas para alcanzar una humedad del 15%, mientras que la FSV-1 solo necesita 6 horas. Luego, se realiza la determinación de la composición química y los poderes caloríficos, siendo esenciales para la siguiente etapa de peletización.

La aplicación de aglomerantes es crucial para la compactación de la biomasa residual en pellets. Sin embargo, esta introducción de aglutinante implica una etapa adicional de secado, incrementando el consumo energético global del proceso. Los ensayos de compactación revelaron que una relación 70/30 %p/p de biomasa/aglutinante es la más funcional para ambas variedades. En términos técnicos, la recuperación de la inversión en el tercer año y una tasa interna de retorno (TIR) del 21% indican la viabilidad financiera del proyecto. Los flujos de efectivo obtenidos, combinados con el análisis de costos y beneficios, respaldan la factibilidad técnica y económica del uso de la cáscara de cacao para la producción de biocombustibles en forma de pellets. Se observa que la producción diaria y su impacto en el precio comercial están directamente relacionados con la eficiencia del proceso. La inversión en tecnología para el procesamiento de la biomasa sugiere una capacidad de producción superior a una tonelada diaria, lo que podría disminuir el costo comercial al aumentar la eficiencia y reducir los gastos operativos asociados con la mano de obra.

En resumen, este estudio integral proporciona información detallada sobre las características de las variedades CRIOLLA y FSV-1 del bagazo de cacao, los procesos de secado, composición química y la eficiencia en la producción de biocombustible tipo pellet, siendo crucial para la toma de decisiones en la producción sostenible y ecoeficiente de pellets de biomasa residual.

Desafíos y Lecciones Aprendidas

- La influencia del clima en el proceso de secado a la intemperie presentó desafíos, especialmente en la estandarización del contenido de humedad. Las variaciones diarias afectan la consistencia de los resultados, siendo esencial implementar estrategias para mitigar este impacto.
- La diferencia en los tiempos requeridos para alcanzar la humedad óptima para peletización entre las dos variedades plantea desafíos logísticos y de planificación. Esto implica ajustes en los procesos de producción para garantizar una eficiencia continua.
- La introducción de aglomerantes para la compactación de pellets incrementa el consumo energético. Optimizar este proceso para reducir la demanda energética y mejorar la ecoeficiencia del sistema es un desafío crucial.
- Aunque las variedades mostraron diferencias en la composición química, la estabilidad de estas características durante el proceso de transformación y peletización es esencial. La variabilidad en la calidad del biocombustible puede afectar su rendimiento y aplicabilidad.
- La elección de variedades de cacao impacta directamente en los resultados del proceso. La comprensión detallada de las características de cada variedad es fundamental para tomar decisiones informadas en términos de eficiencia y rendimiento.
- La variabilidad climática puede afectar la consistencia de los resultados. Implementar estrategias para adaptarse a estas condiciones, como la implementación de sistemas de secado controlado, puede mejorar la reproducibilidad de los experimentos.
- La optimización de cada etapa del proceso, desde la extracción hasta la peletización, es crucial para maximizar la eficiencia y reducir los costos operativos. Esto incluye la selección de proporciones óptimas de aglutinantes y la gestión del tiempo en cada fase.
- Monitorear la composición química a lo largo de todo el proceso permite ajustes en tiempo real para mantener la calidad del biocombustible. La evaluación constante facilita la toma de decisiones informadas y la mejora continua.
- La introducción de aglutinantes y los procesos adicionales de secado pueden aumentar la huella ambiental. La toma de decisiones debe incluir consideraciones ambientales para garantizar que el proceso de transformación sea sostenible y ecoeficiente.
- La planificación cuidadosa de los tiempos de secado y peletización, teniendo en cuenta las diferencias entre variedades, es esencial para mantener la eficiencia operativa. La optimización logística puede minimizar los tiempos muertos y maximizar la productividad.

Recomendaciones

- Realizar investigaciones adicionales para comprender más a fondo las propiedades de otras variedades de cacao, podría ampliar la gama de opciones para la producción de biocombustibles y permitir la selección de variedades con características óptimas para el proceso.
- El uso de estructuras cerradas o invernaderos podría proporcionar condiciones más estables y reproducibles, mejorando así la calidad y consistencia del bagazo durante el secado.
- Investigar alternativas de aglomerantes que minimicen el impacto ambiental y reduzcan el consumo energético asociado con la etapa de peletización, ajustando las proporciones de aglutinantes para lograr una compactación eficiente sin comprometer la calidad del pellet.
- Optimizar los procesos de secado forzado para reducir el tiempo y el consumo energético, podría implicar la incorporación de tecnologías más eficientes, como secadores de lecho fluidizado.
- Realizar evaluaciones de impacto ambiental para comprender completamente las implicaciones medioambientales de todo el proceso ayudará a identificar áreas específicas para mejorar la ecoeficiencia y minimizar cualquier impacto negativo en el entorno.
- La planificación cuidadosa puede reducir los costos operativos y garantizar una producción continua.

- Colaborar con agricultores locales y otras partes interesadas para garantizar la sostenibilidad y responsabilidad social en todo el proceso, fomentando la adopción de prácticas sostenibles en la cadena de suministro del cacao, desde la producción hasta la transformación en biocombustibles.
- Explorar continuamente nuevas tecnologías y metodologías para la transformación del bagazo de cacao en biocombustible.
- La combinación de conocimientos puede proporcionar enfoques holísticos y soluciones más efectivas, esto puede lograrse fomentando la colaboración entre expertos en agronomía, ingeniería, química y ciencias ambientales.
- Promover la educación y la conciencia sobre la importancia de la transformación sostenible del bagazo de cacao, involucrando a la comunidad local, agricultores y empresas en la comprensión de los beneficios y desafíos asociados con este proceso.

Conclusiones

El presente estudio sobre la transformación del bagazo de cacao en biocombustible tipo pellet revela una serie de resultados significativos y ofrece valiosas lecciones y recomendaciones para futuras investigaciones:

- Las variedades criolla (amarilla) y FSV-1 (roja) presentaron diferencias sustanciales en masa, composición química y características de secado. Estas diferencias deben ser cuidadosamente consideradas al seleccionar variedades para la producción de biocombustibles.
- La variabilidad climática afectó el proceso de secado a la intemperie, introduciendo desafíos en la estandarización de la humedad. La implementación de sistemas de secado controlado podría mejorar la consistencia de los resultados.
- La necesidad de aglomerantes para la compactación de pellets introdujo un aumento en el consumo energético. La optimización de las proporciones y la exploración de alternativas de aglutinantes son esenciales para minimizar el impacto ambiental.
- La diferencia en los tiempos requeridos para alcanzar la humedad óptima para peletización entre las dos variedades destaca la necesidad de una planificación logística cuidadosa. La optimización de estos tiempos puede mejorar la eficiencia operativa.
- Las diferencias en la composición química y los poderes caloríficos superiores e inferiores entre las variedades señalan la importancia de comprender la calidad del biocombustible producido. Este conocimiento es esencial para su aplicación práctica.
- Los resultados técnicos respaldan la idea de que la cáscara de cacao peletizada tiene un potencial energético significativo y puede ser una fuente técnica y económicamente viable de biocombustible en Colombia. Se enfatiza la importancia de la gestión eficiente del proceso de producción para maximizar la rentabilidad y se sugiere que futuras investigaciones se centren en la optimización continua del proceso y la adaptación a posibles avances tecnológicos en la producción de biocombustibles a partir de la cáscara de cacao.
- Las consideraciones ambientales deben ser una parte integral del proceso de transformación. La realización de evaluaciones de impacto ambiental continuas permitirá la identificación y mitigación de cualquier impacto negativo.
- Las recomendaciones propuestas, como la investigación adicional sobre variedades, el desarrollo de sistemas de secado eficientes y la promoción de prácticas sostenibles, ofrecen vías concretas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso.

Referencias

Álvarez, A., Pizarro, C., García, R., Bueno, J. L., & Lavín, A. G. (2016). Determination of kinetic parameters for biomass combustion. *Bioresource Technology*, 216, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.039>

Bioenergy International (2018). La biomasa está lista para contribuir a la transición ecológica. *Revista Nº 40*. Recuperado de https://www.avebiom.org/sites/default/files/BIE/BIE_40-Junio_2018.pdf

Castro, J., & Vargas, B. (2019). *Evaluación del potencial energético del residuo sólido de la pos-cosecha del cacao* [Universidad Industrial de Santander]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2019/178126.pdf>

Cutz, L., Haro, P., Santana, D., & Johnsson, F. (2016). Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1411–1431. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.322>

Dornburg, V., & Faaij, A. P. C. (2001). Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies. *Biomass and Bioenergy*, 21(2), 91–108. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00030-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00030-7)

Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (2011). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*.

FEDEMADERAS. (2022, November 10). *Exportaciones de pellets de madera superan las 766.508 toneladas métricas en septiembre – Federación Nacional de Industriales de la Madera*. Fedemaderas. Retrieved December 20, 2023, from <https://fedemaderas.org.co/exportaciones-de-pellets-de-madera-superan-las-766-508-toneladas-metricas-en-septiembre/>

Forero-Nuñez, C. A. . b, Jochum, J. . d, & Vargas, F. E. S. . f g. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets [Efecto del tamaño de partícula y la adición de cáscara de cacao en las propiedades de los pellets de aserrín y carbón]. *Ingeniería e Investigación*, 35(1), 17–23. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157>

García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103(1), 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>

Koppejan, J., & Van-Loo, S. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London: Earthscan.

Martínez-Ángel, J. D., Villamizar-Gallardo, R. A., & Ortiz-Rodríguez, O. O. (2015). Characterization and evaluation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk as a renewable energy source. *Agrociencia*, 49(3), 329–345.

Nakanishi, C. (2004). *Ecoefficiency Indicator Handbook for Products*. Tokio. Retrieved from <http://www.jemai.or.jp/JEMAI DYNAMIC/data/current/detailobj-2073-attachment.pdf>

Obernberger, I., Brunner, T., & Bärnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 973–982. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>

Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653–669. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>

Parthasarathy, P., Narayanan, K. S., & Arockiam, L. (2013). Study on kinetic parameters of different biomass samples using thermo-gravimetric analysis. *Biomass and Bioenergy*, *58*, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.004>

Pérez, J. F., Melgar, A., & Benjumea, P. N. (2012). Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel*, *96*, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.064>

Quintero Osorno, C. A., & Quiroga Velasco, L. F. (2017). Estimación del Potencial Energético a partir de la Biomasa Primaria Agrícola en el Departamento de Cundinamarca. Retrieved December 20, 2023, from <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5703/QuirogaVelascoLuisFelipe2017.pdf;jsessionid=16562704A6625BC401FE20627CB0BBC5?sequence=1>

Razuan, R., Chen, Q., Zhang, X., Sharifi, V., & Swithenbank, J. (2010). Pyrolysis and combustion of oil palm stone and palm kernel cake in fixed-bed reactors. *Bioresource Technology*, *101*(12), 4622–4629. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.079>

Rincón, E., & Wellens, A. (2011). Cálculo de indicadores de ecoeficiencia para dos empresas ladrilleras Mexicanas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *27*(4), 333–345.

Sánchez Quezada, J. P. (2013, September 27). *Evaluación Energética de Cáscaras de Cacao Nacional y CCN-51*. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca. Retrieved December 20, 2023, from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/4508/1/tesis.pdf>

Sarachu, E. (2023). ▷ *Pellets precio diciembre 2023 según asociación AVEBIOM*. e-Ficiencia. Retrieved December 20, 2023, from <https://e-ficiencia.com/precio-de-pellets-actualizado/>

Shen, D. K., Gu, S., Luo, K. H., Bridgwater, A. V., & Fang, M. X. (2009). Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, *88*(6), 1024–1030. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.10.034>

Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2011). *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass (LAP)*. National Renewable Energy Laboratory. Colorado. <https://doi.org/10.1007/s00449-014-1243-0>

Syamsiro, M., Saptoadi, H., Tambunan, B. H., & Pambudi, N. A. (2012). A preliminary study on use of cocoa pod husk as a renewable source of energy in Indonesia. *Energy for Sustainable Development*, *16*(1), 74–77. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.10.005>

Tinaut, F. V., Melgar, A., Pérez, J. F., & Horrillo, A. (2008). Effect of biomass particle size and air superficial velocity on the gasification process in a downdraft fixed bed gasifier. An experimental and modelling study. *Fuel Processing Technology*, *89*(11), 1076–1089. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.04.010>

Ungureanu, N., Vladut, V., Voicu, G., Dinca, M. N., & Zabava, B. S. (2018). Influence of biomass moisture content on pellet properties - Review. *Engineering for Rural Development*, *17*, 1876–1883. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449>

Vásquez, Z. S., de Carvalho Neto, D. P., Pereira, G. V. M., Vandenberghe, L. P. S., de Oliveira, P. Z., Tiburcio, P. B., Rogez, H. L. G., Góes Neto, A., & Soccol, C. R. (2019). Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review. *Waste Management*, *90*, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.030>

Velazquez-Araque, L., Cárdenas Murillo, J., Carrillo, V., & Valenzuela, J. (2015). *Vista de Estudio de las posibilidades de peletización de la cáscara del cacao ecuatoriano y su uso como biocombustible*. Revista Universidad de Guayaquil. Retrieved December 20, 2023, from <https://revistas.ug.edu.ec/index.php/rug/article/view/395/1424>

Velazquez-Araque, L., & Cárdenas, J. (2017). Study of influence of starch as binder material for Ecuadorian cocoa pod husk pellets. *WMSCI 2017 - 21st World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Proceedings*, 1(July), 373–377. https://www.researchgate.net/profile/Luis_Velazquez-Araque/publication/318507526_Study_of_Influence_of_Starch_as_Binder_Material_for_Ecuadorian_Cocoa_Pod_Husk_Pellets/links/596e5d8e4585152dd4ab66f7/Study-of-Influence-of-Starch-as-Binder-Material-for-Ecuadorian-Cocoa-Pod-Husk-Pellets.pdf

Villabona, P. (2019). *Evaluación de la eco-eficiencia del proceso de combustión de biocombustibles de tamo de arroz y rastrojo de maíz*. Universidad Industrial de Santander.

Zhang, L., Xu, C. (Charles), & Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969–982. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.038>

ANEXOS

Evidencias Fotográficas

Registro de la masa inicial de las muestras seleccionadas y registro de la masa del bagazo extraído



Secado natural y seguimiento con gravimetría discontinua



Secado forzado en mufla a 105°C y seguimiento con gravimetría discontinua



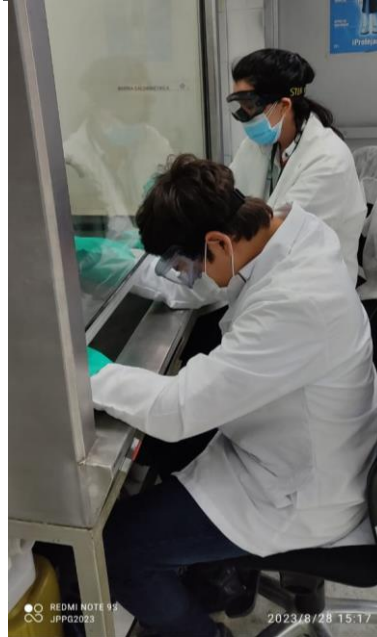


Trituración y Tamizado



Análisis estructural





Preparación de muestras para envío al laboratorio para análisis próximo, elemental y PCS



Promoción del aprovechamiento del bagazo de cacao como biocombustible

