

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN PROCESO SOSTENIBLE PARA LA
PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SÓLIDO COMPACTO A PARTIR DE CEREZA DE
CAFE

JORGE NICOLAS GARCES SANCHEZ

BRAJAN STEVEN MIELES CARREÑO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOMECAICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2025

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN PROCESO SOSTENIBLE PARA LA
PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SÓLIDO COMPACTO A PARTIR DE CEREZA DE
CAFE

JORGE NICOLAS GARCES SANCHEZ

BRAJAN STEVEN MIELES CARREÑO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

PhD. Ingeniería Química

Codirector

Pablo Antonio Nieto Rangel

Ingeniero mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOMECHANICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERIA MECANICA

BUCARAMANGA

2025

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios fuente de sabiduría y formaleza que me guio y me permitió superar todas las dificultades que se presentaron.

A mi madre por apoyarme durante toda mi carrera, por siempre estar a mi lado en los momentos difíciles y a quien le debo mi ser como persona y mis valores.

A mis hermanos por siempre inspirarme a mejorar y ensañarme los valores que me forjaron durante toda mi vida.

A mi padre por darlo todo para apoyarme con lo que podía sin darme la espalda.

A mis seres queridos que siempre estuvieron corrigiendo mis malos actuares y enseñando como mejorar como persona.

Y finalmente agradecerle a mi compañero de proyecto por tener toda la disposición de trabajar y ensañarme muchas cosas que no conocía durante toda mi carrera.

JORGE NICOLAS GARCES SANCHEZ

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2 JUSTIFICACIÓN	17
2. OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GENERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. MARCO TEORICO	19
3.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CAFE	19
3.5 PELLETIZACIÓN	23
3.6 PELLET	24
3.7 ANÁLISIS PRÓXIMO DE LA BIOMASA	24
3.7.1 Humedad	25
3.7.2 Contenido de cenizas	25
3.7.3 Material volátil	26
3.7.4 Carbono fijo	26
3.8 PODER CALORÍFICO	26
4. METODOLOGÍA	27
4.1 PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	27

4.1.1 Secado de la muestra.....	27
4.1.2 Limpieza de la Muestra.....	28
4.1.3 Molido.....	28
4.2 TORREFACCIÓN.....	29
4.2.1 Reactor.....	29
4.2.1 Proceso de Torrefacción.....	30
4.2.2 Calibración del reactor.....	30
4.3 ANÁLISIS PRÓXIMO.....	33
4.3.1 Análisis de humedad.....	33
4.3.2 Análisis de contenido de cenizas.....	34
4.3.3 Análisis de materia volátil.....	36
4.3.4 Carbono fijo.....	37
4.4 PODER CALORIFICO.....	38
4.4.1 Poder Calorífico Superior (PCS) Experimental.....	38
4.4.2 Calculo teórico Poder Calorífico Superior (PCS).....	40
4.4.2 Calculo teórico de Poder Calorífico Inferior (PCI).....	41
4.5 PELLETT.....	41
4.5.1 Producción del pellet.....	41
4.5.2 Análisis de durabilidad del pellet.....	42
4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO MINITAB.....	43
4.6.1 Diseño factorial y análisis de Pareto.....	44
4.6.2 Regresión de modelo lineal.....	51
4.6.3 Agrupación de mejores subconjuntos.....	54

4.7 ANÁLISIS ENERGÉTICO	56
4.7.1 Determinación del consumo energético del proceso de torrefacción.....	56
4.7.2 Análisis de rendimiento energético experimental	58
4.7.3 Análisis de modelos predictivos.....	59
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
5.1 ANÁLISIS DE HUMEDAD.....	61
5.2 ANÁLISIS DE CENIZAS	67
5.3 ANÁLISIS DE VOLÁTILES	72
5.4 ANÁLISIS DE PODER CALORÍFICO	76
5.5 ANÁLISIS DE CARBONO FIJO.....	81
5.6 ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO DEL PROCESO DE TORREFACCIÓN.	84
5.7 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO ENERGÉTICO	86
5.7 ANÁLISIS DE LOS MODELOS PREDICTIVOS	87
5.8 ANÁLISIS PELLET	89
6. CONCLUSIONES	90
REFERENCIAS.....	91
ANEXOS	94

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Partes del fruto de café	20
Figura 2 Proceso de producción de café	21
Figura 3 Peletizadora de tornillo	23
Figura 4 Pellet biomasa.....	24
Figura 5 Cenizas.....	25
Figura 6 Perdida de humedad durante el proceso de secado al sol	27
Figura 7 Cereza de café sin contaminantes	28
Figura 8 Cereza de café molida.....	29
Figura 9 Banco reactor de pirolisis	29
Figura 10 Termocupla tipo K.....	31
Figura 11 Montaje termómetro, termocupla y probeta	31
Figura 12 Rampas de calibración reactor pirolisis.....	32
Figura 13 Bomba calorimétrica.....	38
Figura 14 soporte de muestra	39
Figura 15 soporte de muestra	42
Figura 16 Hoja de trabajo para introducir datos	44
Figura 17 Menú de herramientas Minitab.....	45
Figura 18 Menú herramientas de estadística.	45
Figura 19 Menú herramientas de DOE.	46

Figura 20 Menú herramientas de factorial	46
Figura 21 Menú herramientas de factorial.	47
Figura 22 Menú diseño factorial personalizado “Bajo/Alto”.....	48
Figura 23 Menú diseño factorial.	48
Figura 24 Selección herramienta “analizar diseño”.....	49
Figura 25 Herramienta análisis de diseño factorial.....	49
Figura 26 Graficas herramienta de análisis diseño factorial	50
Figura 27 Ejemplo de Pareto.....	50
Figura 28 Ejemplo resultados de Minitab.	51
Figura 29 Menú estadístico regresión lineal.	52
Figura 30 Menú estadístico regresión lineal 2.	52
Figura 31 herramienta Ajuste modelo de regresión.....	53
Figura 32 Ajuste modelo de regresión.	53
Figura 33 Ejemplo resultados regresión lineal.....	54
Figura 34 Herramientas mejores subconjuntos.	55
Figura 35 Mejores subconjuntos.	55
Figura 36 Ejemplo resultados mejores subconjuntos.....	56
Figura 37 Humedad VS Temperatura para cada tiempo.....	62
Figura 38 Humedad VS Tiempo para cada temperatura.....	62
Figura 39 Diagrama de Pareto contenido de humedad	63
Figura 40 Cenizas VS Temperatura para cada tiempo.....	68
Figura 41 Cenizas VS Tiempo para todas las temperaturas.....	68
Figura 42 Diagrama de Pareto contenido de cenizas	69

Figura 43 Volátiles VS Temperatura para cada tiempo	73
Figura 44 Volátiles VS Tiempo para todas las temperaturas	73
Figura 45 Diagrama de Pareto contenido de volátiles	74
Figura 46 PCS VS Temperatura para todos los tiempos.....	77
Figura 47 PCS VS Tiempo para todas las temperaturas	77
Figura 48 Diagrama de Pareto PCS	79
Figura 49 Carbono fijo VS Temperatura para todos los tiempos.....	82
Figura 50 Carbono fijo VS Tiempo para todas las temperaturas	82
Figura 51 Diagrama de Pareto carbono fijo	84
Figura 52 Montaje Wattmetro digital	85

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Matiz proceso de torrefacción.....	30
Tabla 2 Temperatura objetivo vs. corregida	32
Tabla 3 Resultado ensayo de humedad	61
Tabla 4 Precisión de la ecuación 7	64
Tabla 5 Precisión de la ecuación 8	65
Tabla 6 Subconjuntos de variables para asociadas a la humedad	66
Tabla 7 Precisión de la ecuación 10.....	67
Tabla 8 Resultado ensayo de cenizas	67
Tabla 9 Precisión de ecuación 11	70
Tabla 10 Precisión de ecuación 12.....	71
Tabla 11 Subconjuntos de variables para asociadas a las cenizas	71
Tabla 12 Precision de ecuacion 13.....	72
Tabla 13 Resultados ensayo de volátiles.....	72
Tabla 14 Precisión de ecuación 14.....	75
Tabla 15 Precisión de ecuación 15.....	76
Tabla 16 Resultado ensayo de poder calorífico	76
Tabla 17 Precisión de ecuación 16.....	79
Tabla 18 Subconjuntos de variables para asociadas al PCS	80
Tabla 19 Resultados obtenidos de carbono fijo	81

Tabla 20 Calculo teórico de eficiencia energética	88
Tabla 21 Comparación eficiencia energética teórica VS experimental	88
Tabla 22 Resultados ensayo integridad del pellet	89

ANEXOS

	pág.
Anexos A Proceso de secado de la cereza de café al sol	94
Anexos B Calibración del reactor de pirolisis.....	94
Anexos C Ensayo de humedad.....	95
Anexos D Ensayo de cenizas	96
Anexos E Ensayo de material volátil	97
Anexos F Ensayo caída libre (Drop Test).....	98
Anexos G Proyección mediante modelo de % humedad	99
Anexos H Proyección modelo de % cenizas.....	99
Anexos I Proyección modelo de % volátiles	100
Anexos J Proyección rendimiento masico del proceso de torrefacción.....	100

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN PROCESO SOSTENIBLE PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE SÓLIDO COMPACTO A PARTIR DE CEREZA DE CAFE

AUTOR: JORGE NICOLAS GARCES SANCHEZ, BRAJAN STEVEN MIELES CARREÑO

PALABRAS CLAVE: TORREFACCIÓN, PIROLISIS, PELLET, ANÁLISIS PROXIMO

DESCRIPCIÓN: La producción de café genera grandes volúmenes de residuos, siendo la cereza de café uno de los más significativos. Este subproducto, comúnmente desechado sin control, ocasiona contaminación en suelos y fuentes hídricas. Con el propósito de valorizar estos residuos y reducir su impacto ambiental, el presente estudio evaluó un proceso sostenible para la producción de combustible sólido compacto a partir de dicha biomasa.

La metodología incluyó el secado y limpieza de la materia prima, procesos de torrefacción en diferentes condiciones de tiempo y temperatura, análisis próximo, determinación del poder calorífico, producción y caracterización de pellets, así como la evaluación de la eficiencia energética del combustible obtenido. Los resultados permitieron identificar la combinación óptima de condiciones de torrefacción en función del poder calorífico, el rendimiento másico y la eficiencia energética. En cuanto a la peletización, no fue necesario el uso de aditivos aglomerantes, debido a la composición del material torrefactado, logrando pellets con integridad estructural adecuada sin alterar sus propiedades.

El estudio demostró que el combustible sólido producido presenta propiedades energéticas superiores a las de la biomasa en estado natural. No obstante, considerando el rendimiento másico y el consumo energético del proceso, se evidenció que la cereza de café in natura puede representar una opción más eficiente como combustible.

Desarrollo y evaluación de un proceso sostenible para la producción de combustible sólido compacto a partir de cereza de café

Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. PhD. Ingeniería Química. Codirector: Pablo Antonio Nieto Rangel. Ingeniero mecánico.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A SUSTAINABLE PROCESS FOR THE PRODUCTION OF COMPACT SOLID FUEL FROM COFFEE CHERRIES

AUTHOR: JORGE NICOLAS GARCES SANCHEZ, BRAJAN STEVEN MIELES CARREÑO

KEY WORDS: ROASTING, PYROLYSIS, PELLETS, PROXIMATE ANALYSIS

DESCRIPTION: Coffee production generates large volumes of waste, with coffee cherries being one of the most significant. This by-product, commonly discarded without control, causes contamination in soils and water sources. With the aim of recovering this waste and reducing its environmental impact, this study evaluated a sustainable process for the production of compact solid fuel from this biomass.

The methodology included drying and cleaning the raw material, roasting processes under different time and temperature conditions, proximate analysis, determination of calorific value, production and characterization of pellets, as well as evaluation of the energy efficiency of the fuel obtained. The results allowed the identification of the optimal combination of roasting conditions in terms of calorific value, mass yield, and energy efficiency. As for pelletization, the use of binding additives was not necessary due to the composition of the torrefied material, achieving pellets with adequate structural integrity without altering their properties.

The study showed that the solid fuel produced has superior energy properties to those of biomass in its natural state. However, considering the mass yield and energy consumption of the process, it was found that raw coffee cherries may represent a more efficient option as fuel.

Development and Evaluation of a Sustainable Process for the Production of Compact Solid Fuel from Coffee Cherry

Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering.

Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez, PhD in Chemical Engineering.

Co-director: Pablo Antonio Nieto Rangel, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los mayores productores de café del mundo, siendo este cultivo uno de los pilares de su agricultura y un componente fundamental de la economía nacional. Sin embargo, su producción genera grandes cantidades de residuos que en su mayoría no son aprovechados, entre ellos la cereza de café, la cual resulta altamente contaminante y perjudicial para los suelos y las fuentes hídricas. Esta situación representa un desafío ambiental, pero también una oportunidad para el desarrollo de nuevas fuentes de energía y para el aprovechamiento eficiente de estos desechos.

El presente proyecto, titulado “**Desarrollo y Evaluación de un Proceso Sostenible para la Producción de Combustible Sólido Compacto a partir de Cereza de Café**”, tiene como objetivo evaluar un proceso sostenible que permita transformar los desechos generados en la producción de café en un combustible sólido compacto. Con ello, se busca ofrecer una alternativa que contribuya al tratamiento de estos residuos y, de manera paralela, facilite la generación de nuevas fuentes de energía.

Para alcanzar el objetivo planteado, se diseñó una matriz experimental 3x3, variando la temperatura entre 240, 270 y 300 °C, y el tiempo de torrefacción entre 40, 50 y 60 minutos. Posteriormente, se realizó la caracterización de la biomasa empleando un horno eléctrico, mediante el cual se llevaron a cabo ensayos de humedad, contenido de cenizas y volátiles. Luego, se determinó el poder calorífico utilizando una bomba calorimétrica, se calculó el contenido de carbono fijo y, finalmente, se empleó el software Minitab para modelar el comportamiento de las variables evaluadas. Con estos modelos se calculó la eficiencia energética de la biomasa en el rango de 200 a 300 °C, identificando el punto con mayor eficiencia y determinando la viabilidad del proceso a través de un análisis de energía.

Los resultados obtenidos destacan la identificación del punto óptimo del proceso que asegura su viabilidad, así como la generación de modelos de alta precisión que describen el comportamiento de las características de la biomasa y la eficiencia máxima alcanzada. Estos hallazgos proponen una alternativa para el aprovechamiento de la cereza de café y la producción de una nueva alternativa de combustible.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los principales problemas que agobia a la mayoría de las empresas a nivel mundial es la gran escasez del recurso energético, que causa consigo la interrupción abrupta de los procesos operacionales de la empresa, conllevando a una inflación de los costos e impidiendo un crecimiento y desarrollo económico (Lebepe & Mathaba, 2024).

Es por ello que es de suma importancia contar con una alta disponibilidad energética para el correcto desarrollo de las actividades de la industria, pero debido al rápido crecimiento de la industria y la creciente expansión demográfica de los últimos años, ha generado una presión sobre los recursos finitos, generando unos escasos en los recursos primarios como lo son el agua, la tierra y la energía (Wang & Azam, 2024), es por ello que es sumamente importante buscar alternativas que permitan suplir esta necesidad.

Colombia siendo un país con una gran riqueza natural y una industria en constante crecimiento se enfrenta a una creciente demanda energética, que a su vez deriva en problemas para su cobertura. Dentro de las industrias con mayor desarrollo se encuentra la cafetera, la cual produjo más de 12,6 millones de sacos de café el pasado año 2023, generando unos 11.9 billones de pesos (2700 millones de dólares) (Buencafé & Almacafé, n.d.), siendo una de las industrias más lucrativas del país, pero que a su vez resulta ser una de las industrias con mayor índice de contaminación de las tierras a nivel nacional produciendo 375 mil toneladas de residuos orgánicos por cada 600 mil toneladas de café producido (CASTRO-MORA J.J1 ; BOTELLO-SUÁREZ W. A, 2021).

Los residuos de café como la cereza y las aguas residuales de su procesamiento resultan altamente tóxicas para la fauna y flora natural debido a que dichos residuos contienen cafeína y fenólicos que inhiben la microbiana y su degradación en el suelo causando el daño y la deforestación de este, a su vez estos residuos también contienen taninos que son altamente tóxicos, para los animales (Alemayehu et al., 2022).

Los desechos de café no son utilizados de manera óptima y solo resultan como un producto contaminante (CASTRO-MORA J.J1; BOTELLO-SUÁREZ W. A, 2021), a este problema se le suma los escasos de energía presentada en los últimos años debido al constante desarrollo de país, por lo tanto, es sumamente importante buscar una solución que abarque el marco energético y

ambiental de este sector tan importante en la economía Colombia y que a su vez impulse un desarrollo más sostenible y seguro para el país.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En los últimos años se ha presentado un crecimiento exponencial en la industria a nivel mundial, lo que ha traído consigo una fuerte demanda energética, esto ha impulsado al desarrollo de nuevas fuentes de energía con el fin de suplir esta necesidad, de entre estas alternativas se encuentra la biomasa, la cual resulta en una alternativa viable y renovable en zonas agropecuarias en la cuales abundan los desechos orgánicos.

Santander al ser una de las principales zonas cafetaleras de la región, cuenta con toneladas de desechos orgánicos, principalmente cerezas de café, los cuales son en su mayoría desechados en ríos y veredas, lo que causa un daño considerable en el medio ambiente. Por lo tanto, la producción de combustible a partir de los residuos de la producción de café tiene como objetivo principal transformar un problema ambiental en una oportunidad económica y sostenible. Este combustible, compatible con máquinas térmicas que operan con carbón, ofrece una alternativa más ecológica y reduce la dependencia de combustibles fósiles. Además, la valorización de estos residuos a través de su conversión en combustible podría generar incentivos económicos, fomentando un tratamiento adecuado de los desechos de café

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar un proceso sostenible para la producción de combustible sólido compacto a partir de los desechos obtenidos en la producción de café.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1- Determinar los parámetros de tiempo y temperatura de torrefacción para la caracterización de un combustible sólido compacto obtenido de la cereza de café, mediante la evaluación de su poder calorífico
- 2- Determinar las propiedades mecánicas y termodinámicas del pellet de combustible obtenido mediante ensayos de laboratorio estipulados en la norma ISO 17831-1.
- 3- Contrastar el poder calorífico presente en la biomasa de café, la del combustible procesado y la energía requerida para la producción de este, por medio de la determinación de la eficiencia energética del proceso.

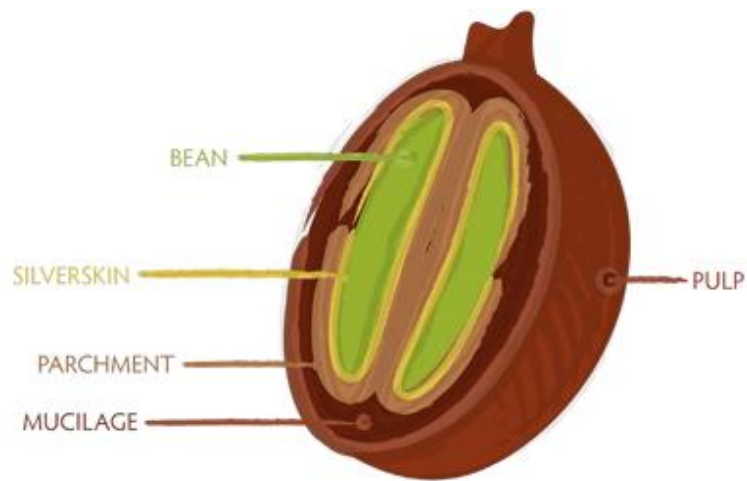
3. MARCO TEORICO

3.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CAFE

El proceso de producción del café se compone de múltiples etapas, las cuales se pueden resumir a; la siembra, el cultivo, la cosecha y procesado. De entre los métodos de procesamiento resaltan la producción en seco, húmedo y semihúmedo, dependiendo del tipo de método que se utilice, el café obtendrá un sabor distinto al final de su producción, en el caso de Colombia, el método húmedo es el más popular, debido a que brinda una mejor preservación de los atributos del grano de café además de producir café más homogéneo (Mendoza Martínez et al., 2021).

La producción de café comienza recolectando y lavando la cereza de café, al cual como podemos ver en la *Figura 1* se compone de la cereza en la parte exterior, el mucilago recubriendo la semilla, el pergamino y la semilla de café en el interior, una vez recolectada la cereza de café, se realiza un proceso conocido como descerezado, mediante el cual se separa la semilla del fruto, para esto se utiliza una maquina conocida como despulpadora de café, al terminar este proceso se desecha la pulpa puesto que no tiene ninguna utilidad y se recogen los granos de café a los cuales se les realiza un proceso de lavado, el cual consiste en retirar la capa pegajosa y azucarada (residuo de la separación de la semilla de la pulpa) denominada como mucilago, posteriormente las semillas son llevadas a un tanque de fermentación para la eliminación de los residuos de mucilago restantes del proceso anterior (Mendoza Martínez et al., 2021).

Figura 1 Partes del fruto de café

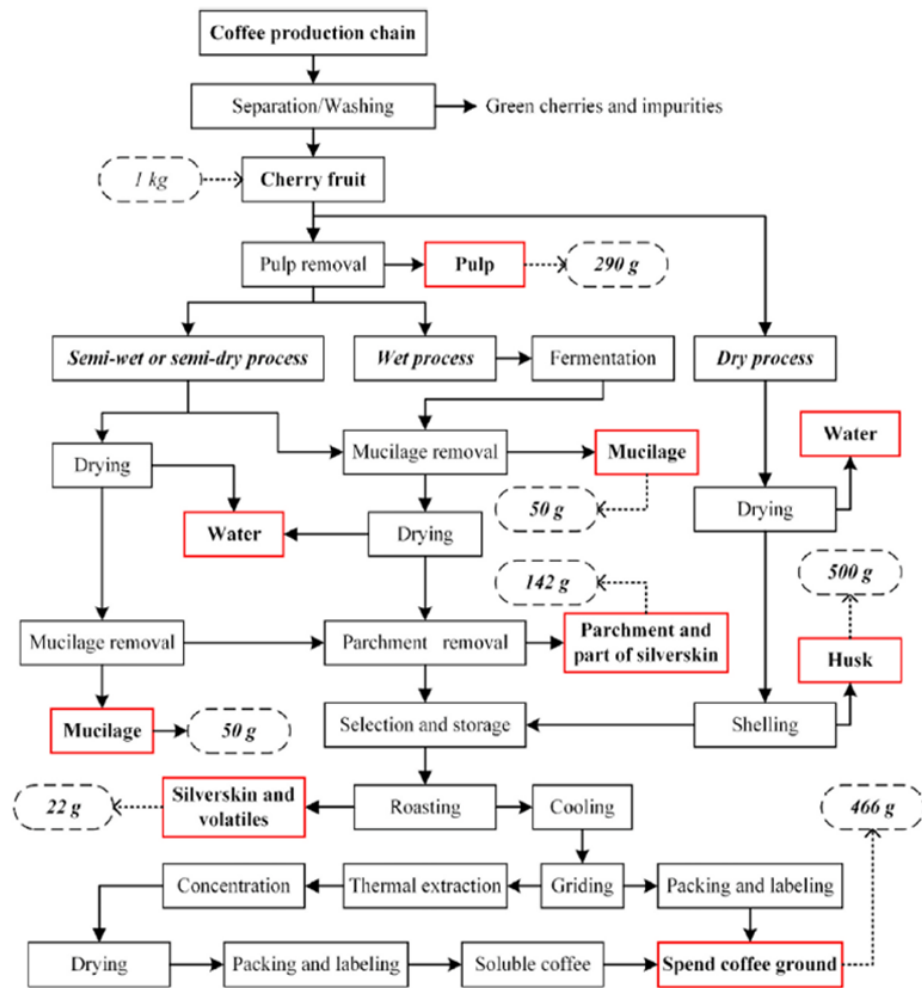


Fuente: Anatomy of a Coffee Cherry, blog Coffee Travels, Michaela Tomchek, 2018

Al finalizar la fermentación, las semillas son lavadas para eliminar cualquier residuo restante para luego pasar al proceso de secado, el cual generalmente se realiza mediante dos formas: secado natural, que consiste en dejar las semillas al sol durante un determinado tiempo y el secado artificial, que consiste en utilizar hornos o secadoras mecánicas para realizar este proceso, sin importar cual método se utilice se debe garantizar que la humedad al final del proceso sea del 12%, al finalizar el proceso de secado se retira la capa exterior del grano (conocida como pergamino) para pasar a la etapa de selección y clasificación de los granos, en esta etapa los granos se clasifican según su peso, tamaño y forma, cuando se termina su clasificación se pasa al proceso de tostado de los granos, finalmente los granos ya tostados se muelen y trituran para obtener el café en polvo listo para consumir (Mendoza Martínez et al., 2021).

La *Figura 2* ilustra de manera más detallada el proceso de producción del café para un caso donde se recolecta un kilogramo de cereza de café, en esta misma figura también se pueden evidenciar factores como la cantidad de pulpa desechada por kilogramo de cereza de café y cuánto café se produce realmente por cada kilogramo de fruta.

Figura 2 Proceso de producción de café



Fuente: A Brazilian case. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021.

3.2 BIOMASA

La biomasa es toda materia orgánica renovable, como, por ejemplo, los residuos vegetales, animales y agrícolas (Isikgor & Becer, 2015). La biomasa es la mayor fuente de carbono del mundo, siendo un sustituto ideal para reemplazar parcialmente a los compuestos fósiles en la fabricación de productos derivados del carbono, la producción de energías (Ismael et al., 2024), y la fabricación de combustibles (Gutiérrez-Antonio et al., 2017).

3.3 BIOCOMBUSTIBLE

Los biocombustibles son combustibles producidos a partir de la biomasa, es decir, son combustibles que se producen mediante materia orgánica (UNAM, n.d.). Los biocombustibles son una alternativa al uso de combustibles fósiles, pues están hechos de material renovable y ayudan a la reducción de los gases de efecto invernadero (Vega et al., 2024).

3.4 TORREFACCIÓN

La torrefacción (también conocida como pirólisis a baja temperatura) es un proceso térmico donde en ausencia de oxígeno se calienta biomasa a baja temperatura hasta alcanzar temperaturas de entre 200 a 320 °C, este proceso mejora las propiedades de la biomasa como combustible, además hace el material menos propenso a retener humedad y aumenta densidad energética. (Solar Bean Coffee, n.d.)

El proceso de torrefacción se compone de 3 fases, la primera fase consiste en preparar la biomasa a torrefactar, esta preparación consiste en realizar un secado previo de la materia, puesto que esta contiene altos niveles de agua en su estructura lo que puede dificultar el proceso de torrefactado, además si la materia dispone de un gran tamaño debe ser triturada antes de comenzar la torrefacción para que de esta forma se tenga una mayor área y un menor radio de penetración del calor, la siguiente fase es el calentamiento, en esta fase se introduce la biomasa en un horno o tambor de torrefacción y comienza a calentarse gradualmente a unos intervalos de temperatura controlados, dichos intervalos no deben superar los 50°C por minuto, a medida que la fase de calentamiento ocurre el material comienza a sufrir cambios, el primer cambio consiste en la deshidratación del material producto del aumento gradual de la temperatura, seguido de eso comienza el proceso de pirólisis en el cual debido a los aumentos de temperatura la biomasa comienza a descomponerse pasando por la hemicelulosa seguida de la celulosa y por último la lignina, durante todo el proceso de descomposición la biomasa libera gases volátiles que causan una pérdida de entre el 20 al 30% de la masa

original, finalmente cuando todo el proceso se calienta se pasa a la última fase, que consiste en enfriar rápidamente el material para evitar una degradación de los compuestos volátiles (Solar Bean Coffee, n.d.).

3.5 PELLETIZACIÓN

La paletización es un proceso mediante el cual un material particulado o muy pequeño se comprime (generalmente mediante una peletizadora) hasta transformarse en un pellet. (Andrés González Hassig, 2013)

Figura 3 Peletizadora de tornillo



Fuente: Screw Barrel Gear Box for Two Stage Waste Recycling Machine (Main Machine & Vice Machine), sitio PRM-Taiwan

Los pellets deben cumplir con la norma UNE-EN ISO 17225-6 que dictamina la durabilidad mecánica que debe tener un pellet

3.6 PELLETS

El pellet es un conjunto de material particulado comprimido (generalmente en forma cilíndrica), esto se hace para permitir una prolongación de la vida útil de la muestra, también brinda un mejor control sobre la humedad de la biomasa y mejora su eficiencia térmica, además brinda otro tipo de ventajas como un mejor en el transporte de la materia y optimización de espacios. Los pellets son comúnmente utilizados en la generación de energías como biocombustible y en la industria ganadera como alimento duradero para los animales. (Andrés González Hassig, 2013)

Figura 4 Pellet biomasa



Fuente: Pellets de biomasa como combustible renovable obtenido de residuos comprimidos. Imagen tomada de Pellets de biomasa, CONSMATEC.

3.7 ANÁLISIS PRÓXIMO DE LA BIOMASA

Consiste en la evaluación de las propiedades determinantes de la biomasa, tales como la humedad, contenido de cenizas y contenido de material volátil.

3.7.1 Humedad

La humedad se define como la cantidad de agua que contiene una biomasa (Cientisol, 2024), esta cantidad se expresa en porcentaje y suele rondar entre el 20 al 55% para biomasa en estado natural, mientras que para biomasa a la que se le haya realizado un proceso de secado puede rondar el 10% (Aniza, Chen, Kwon, Bach & Hoang, 2024). El análisis de humedad de la biomasa se realiza según dicta la norma UNE-EN ISO 18134-3.

3.7.2 Contenido de cenizas

Las cenizas de biomasa se definen como los residuos restantes del proceso de combustión de dicha materia, su composición es mayoritariamente alcalina (Caillat & Vakkilainen, 2013), su cantidad depende de las impurezas y materia inorgánica, y algunos minerales naturales como K, NA, CA, Mg, S y P presentes en la biomasa (Aniza, Chen, Kwon, Bach & Hoang, 2024).

Figura 5 Cenizas



Fuente: Imagen de cenizas de carbón, ilustrando la apariencia de la ceniza generada tras la combustión. Imagen tomada de Ceniza, Wikipedia.

Las cenizas se clasifican en dos tipos, volantes y de fondo, las cenizas volantes contienen hidrocarburos altamente ligeros que les permite transportarse sobre el gas, mientras que las cenizas de fondo son más pesadas lo que evita que salgan del fondo, de ahí su nombre (Aniza, Chen, Kwon, Bach & Hoang, 2024).

El análisis de cenizas de la biomasa se realiza según dicta la norma UNE-EN ISO 18122

3.7.3 Material volátil

El material volátil es la masa que se desprende en forma de gases y vapores cuando se calienta la biomasa hasta su temperatura de combustión en ausencia de aire, puede llegar a componer el 80% de la biomasa y llegar a ser 2,5 mayor al carbono fijo (Racero-Galaraga, Rhenals-Julio, Sofan-German, Mendoza & Bula-Silvera, 2024).

El análisis de material volátil de la biomasa se realiza según dicta la norma UNE-EN ISO 18123

3.7.4 Carbono fijo

El carbono fijo es la cantidad de carbono que queda después de que se realiza el proceso de volatilización de la biomasa, es decir, es el carbono no volátil presente, dicho carbono suele representar entre un 3 a un 24% de la biomasa, este porcentaje puede aumentar si a la biomasa se le realiza previamente un proceso de torrefacción (Aniza, Chen, Kwon, Bach & Hoang, 2024).

En algunos casos el carbono fijo puede proporcionar un valor estimado del poder calorífico presente en la biomasa (Aniza, Chen, Kwon, Bach & Hoang, 2024).

3.8 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico se define como la cantidad de calor que se genera por kilogramo o metro cubico de combustible al oxidarse.

El poder calorífico se divide en dos tipos, el poder calorífico superior (PCS o HHV) y el poder calorífico inferior (PCI o LHV), el poder calorífico superior es el calor generado durante la reacción de combustión mientras que por su parte el poder calorífico inferior se refiere al calor real que se obtiene durante la combustión despreciando la energía de condensación del agua y otros factores como el nitrógeno (Vaillant, s.f).

4. METODOLOGÍA

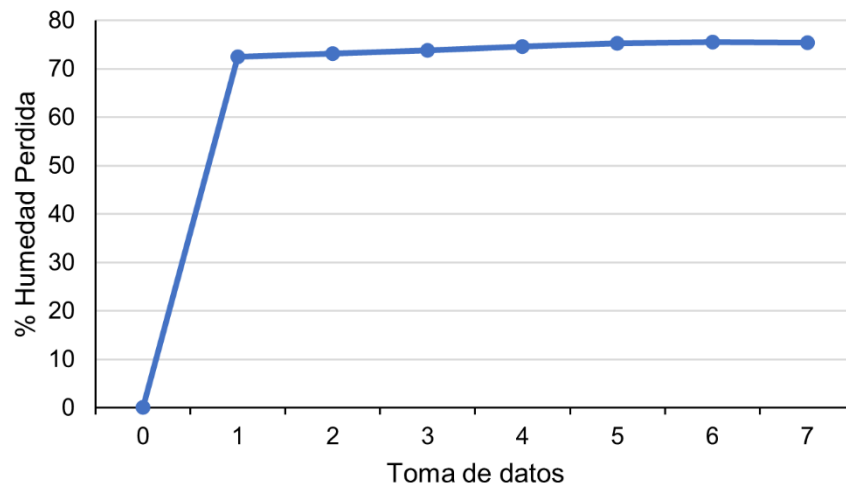
4.1 PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La cereza proviene de café del tipo Castilla cosechado y descerezado el día 20 de enero del 2025 en la finca Panamá ubicada en zona rural del municipio de Contratación Santander, Colombia

4.1.1 Secado de la muestra

Se realizó un proceso de secado natural mediante el uso de planchones de secado, los mismos que se utilizan para el secado y producción del café pergamino, este procedimiento se realizó de forma controlada en un lapso de 4 días, en los cuales, mediante 3 muestras independientes se midió la pérdida de masa tomando datos 2 veces al día, tiempo durante el cual se observó una reducción en la concentración de humedad aproximada al 70% de la masa inicial de la cereza.

Figura 6 Pérdida de humedad durante el proceso de secado al sol



Fuente: Fuente propia

4.1.2 Limpieza de la Muestra

Durante el proceso manual de recolección del café se suelen colar algunas impurezas, principalmente ramas y hojas de la misma planta, adicionalmente en el proceso de descerezado no se eliminan en su totalidad los granos de café con tamaño irregular o dañados, por lo tanto, para asegurar la homogeneidad de la materia prima se realizó la limpieza de forma manual, en la cual se evidencio que, del total de materia seca, el 92% corresponde a cereza de café.

Figura 7 Cereza de café sin contaminantes



Fuente: Fuente propia

4.1.3 Molido

El proceso de molido se llevó a cabo mediante el uso de un molino manual y posterior mente tamizado con un tamiz No. 20, con el propósito de asegura un grano de tamaño de 0,5mm como máximo.

Figura 8 Cereza de café molida



Fuente: Fuente propia

4.2 TORREFACCIÓN

4.2.1 Reactor

El proceso de torrefacción se realizará mediante un reactor de pirolisis vertical, con sistema de control ON/OFF y de atmosfera controlada con nitrógeno alimentado mediante un tanque de nitrógeno y flujo controlado mediante un caudalímetro mecánico.

Figura 9 Banco reactor de pirolisis



Fuente: Fuente propia

4.2.1 Proceso de Torrefacción.

La torrefacción de biomasa es un proceso térmico que se lleva a cabo en un rango de 200 a 320 °C, bajo atmósfera inerte o con bajo contenido de oxígeno, con tiempos de residencia que varían entre 20 y 60 minutos dependiendo del tipo y tamaño de partícula de la biomasa, con tasas de calentamiento lenta de aproximadamente 10 °C/min.

La matriz experimental de torrefacción se definió en temperaturas de 240, 270 y 300 °C, y tiempos de 40, 50 y 60 minutos, teniendo un total de 9 ensayos de torrefacción y una muestra adicional con la materia in natura

Tabla 1 Matiz proceso de torrefacción

Muestra	Tiempo de residencia	Temperatura de residencia
0	In natura	In natura
1	40 minutos	240° Centígrados
2	40 minutos	270° Centígrados
3	40 minutos	300° Centígrados
4	50 minutos	240° Centígrados
5	50 minutos	270° Centígrados
6	50 minutos	300° Centígrados
7	60 minutos	240° Centígrados
8	60 minutos	270° Centígrados
9	60 minutos	300° Centígrados

Fuente: Fuente propia

4.2.2 Calibración del reactor

Siguiendo el propósito de asegurar la capacidad de réplica del proceso de torrefacción, se realizó la calibración y corrección de la temperatura del reactor utilizado para el desarrollo del proyecto, esto se llevó a cabo mediante el diseño y construcción de una probeta compatible con el reactor, en la cual se pudiera introducir una termocupla centrada de manera axial a esta, una termocupla tipo k roscada con el cable blindado y un termómetro digital.

Para este proceso se cargó la probeta con la materia prima compactándola hasta llenarla por completo, el reactor se programó de con 6 rampas, con velocidad de calentamiento constante de 6 grados por minuto y un tiempo de estabilización entre rampas de 20 minutos, teniendo la primera rampa en 200°C, con intervalos de 20°C y hasta 300°, como se muestra en la siguiente grafica.

Figura 10 Termocupla tipo K



Fuente: Fuente propia

Figura 11 Montaje termómetro, termocupla y probeta



Fuente: Fuente propia

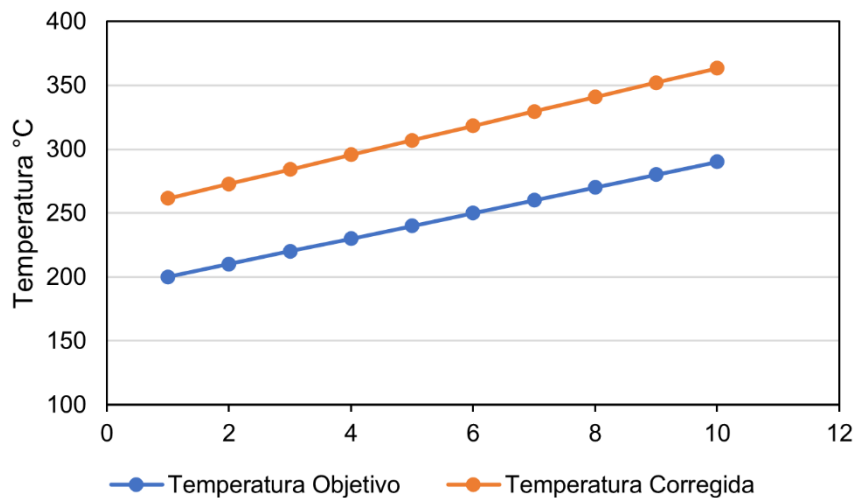
Se llevo el registro de la temperatura de la termocupla sumergida en la materia prima una vez se estabilizará en las zonas de temperatura estable, y antes de iniciar cada rampa de calentamiento. Teniendo en cuenta los datos obtenidos se realizó la corrección entre la temperatura de la resistencia y la de la probeta mediante la función de interpolación de Excel.

Tabla 2 Temperatura objetivo vs. corregida

Temperatura Objetivo	Temperatura Corregida
200	261,579
210	272,894
220	284,210
230	295,525
240	306,840
250	318,155
260	329,470
270	340,786
280	352,101
290	363,416
300	374,731

Fuente: Fuente propia

Figura 12 Rampas de calibración reactor pirolisis



Fuente: Fuente propia

4.3 ANÁLISIS PRÓXIMO

4.3.1 Análisis de humedad

El análisis de contenido de humedad se lleva a cabo bajo la norma ISO 18134-3:2023, siguiendo los siguientes requerimientos y procesos.

Equipos

- Estufa de secado, capaz de ser controlada a una temperatura de (105 ± 2) °C
- Platos de vidrio con tapa
- Balanza analítica con precisión de $\pm 0,1$ mg.
- Desecador con desecante

Tamaño de muestra

La masa de la porción de ensayo se definió en 1,5 gramos aproximadamente, teniendo en cuenta que esta debe tener una masa mínima de 1 gramo.

Procedimiento

- Se pesa el plato de vidrio con su respectiva tapa tomando el peso registrado con precisión de 0,1 mg
- Se tara la balanza con el plato sin tapa posicionado y se agrega la muestra hasta completar el objetivo de al menos 1 gramo, repitiendo este proceso hasta conseguir 3 replicas

- Se introducen los platos solo con la muestra en la estufa de secado a temperatura ambiente y se calientan de manera controlada hasta llegar a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 180 min.
- Se extraen las muestras de la estufa, se tapan, se enfrían en el desecador y se pesan nuevamente en la balanza
- Se repite el proceso de calentamiento por un tiempo de 60 minutos, se enfrían en el desecador y se pesan por última vez.

Cálculo de contenido de humedad

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (1)$$

M_{ad} : Contenido de humedad

m_1 : Masa del recipiente vacío con tapa (g)

m_2 : Masa de muestra antes de secado (g)

m_3 : Masa del recipiente más la masa después del secado (g)

El resultado se debe calcular con dos cifras decimales y el valor medio de ambas determinaciones se debe redondear al 0,1 %

4.3.2 Análisis de contenido de cenizas

El análisis de contenido de cenizas se lleva a cabo bajo la norma ISO 18122:2022, siguiendo los siguientes requerimientos y procesos.

Equipos

- Horno eléctrico capaz de proporcionar una zona de temperatura uniforme y control de temperatura, tiempo y velocidad de calentamiento
- Crisoles cerámicos con tapa

- Balanza analítica con precisión de $\pm 0,1$ mg.
- Desecador con desecante

Tamaño de muestra

La masa de la porción de ensayo se definió en 1,5 gramos aproximadamente, teniendo en cuenta que esta debe tener una masa mínima de 1 gramo.

Procedimiento

- Se pesa el crisol cerámico con su respectiva tapa tomando el peso registrado con precisión de 0,1 mg
- Se tara la balanza con el crisol cerámico sin tapa posicionado y se agrega la muestra hasta completar el objetivo de al menos 1 gramo, repitiendo este proceso hasta conseguir 3 replicas
- Se introducen los crisoles con la muestra en el horno y se programa con dos rampas, una primera con temperatura objetivo de 250°C con velocidad de calentamiento de 5°C/min, se mantendrá esta temperatura por 60 minutos, la temperatura objetivo de la segunda rampa será de 550°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min, manteniendo la temperatura por un periodo de 120 minutos
- Se extraen las muestras del horno, se tapan, se someten a una etapa de enfriamiento inicial fuera del desecador durante un periodo de entre 5 a 10 min, posteriormente se tapan e introducen y enfrían en el desecador y se pesan en la balanza.

Calculo

El contenido de ceniza en base seca, A_d , de la muestra, expresado como fracción en masa en % y sobre base seca, se debe calcular usando la fórmula (2):

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{(100 - M_{ad})} \quad (2)$$

M_{ad} : Contenido de humedad

m_1 : Masa del crisol vacío (g)

m_2 : Masa del crisol más la porción del ensayo (g)

m_3 : Masa del crisol más la ceniza (g)

4.3.3 Análisis de materia volátil

El análisis de contenido de volátiles de llevo a cabo bajo la norma ISO 18123:2023, siguiendo los siguientes requerimientos y procesos.

Equipos

- Horno eléctrico capaz de proporcionar una zona de temperatura uniforme y control te temperatura, tiempo y velocidad de calentamiento
- Crisoles cerámicos con tapa
- Balanza analítica con presión de $\pm 0,1$ mg.
- Desecador con desecante

Tamaño de muestra

La masa de la porción de ensayo se definió en 1,5 gramos aproximadamente, teniendo en cuenta que esta debe tener una masa mínima de 1 gramo.

Procedimiento

- Se pesa el crisol cerámico con su respectiva tapa tomando el peso registrado con precisión de 0,1 mg

- Se tara la balanza con el crisol cerámico sin tapa posicionado y se agrega la muestra hasta completar el objetivo de al menos 1 gramo, repitiendo este proceso hasta conseguir 3 replicas
- Se calienta el horno hasta los $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$
- Se introduce el crisol con tapa y muestra durante un periodo de 7 minutos \pm 5 segundos.
- Se extraen las muestras del horno, se tapan, se someten a una etapa de enfriamiento inicial fuera del desecador durante un periodo de entre 5 a 10 min, posteriormente se tapan e introducen y enfrían en el desecador y se pesan en la balanza.

Calculo

El contenido de materia volátil, de la porción de ensayo, expresado como fracción másica en base seca, se calcula mediante la siguiente ecuación

$$A_d = \left[\frac{100 \times (m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} - M_{ad} \right] \times \frac{100}{(100 - M_{ad})} \quad (3)$$

M_{ad} : Contenido de humedad

m_1 : Masa del crisol vacío y su tapa (g)

m_2 : Masa del crisol con tapa más la porción del ensayo (g)

m_3 : Masa del crisol con tapa más y la materia después del calentamiento (g)

4.3.4 Carbono fijo

El carbono fijo es la cantidad de carbono que queda después de que se realiza el proceso de volatilización de la biomasa, es decir, es el carbono no volátil presente, dicho carbono suele representar entre un 3 a un 24% de la biomasa, este porcentaje puede aumentar si a la biomasa se le realiza previamente un proceso de torrefacción.

Este se puede determinar de manera teórica como la diferencia entre el total d la muestra y las fracciones másicas de humedad, volátiles y cenizas según (MOGOLLÓN REYES; MENDOZA NEVADO, 2025)

$$CF = 100 - M_{ad} - VM - ASH \quad (4)$$

M_{ad} : Contenido de humedad

VM: Contenido de material volátil

ASH: Contenido de cenizas

4.4 PODER CALORIFICO

4.4.1 Poder Calorífico Superior (PCS) Experimental

El poder calorífico superior se determinó mediante el uso de una bomba calorimétrica y bajo la norma ISO 1928:2020, siguiendo los siguientes requerimientos y procesos.

Figura 13 Bomba calorimétrica



Fuente: Fuente propia

Equipos y Consumibles

- Bomba calorimétrica (adiabática o isoperibólica) con:
- Recipiente de combustión (bomba) resistente a alta presión (≥ 3 MPa).
- Sistema de ignición eléctrica (alambre de encendido).
- Recipiente calorimétrico con agua y agitación homogénea.
- Sistema de medición de temperatura con resolución de al menos $0,001$ °C.
- Porta muestra metálico.
- Balanza analítica con precisión de $\pm 0,1$ mg.
- Fuente de oxígeno con pureza $\geq 99,5$ %.
- Ácido benzoico estándar (Poder calorífico certificado).
- Filamento consumible.

Preparación de la muestra

Se prepara una muestra de entre 0,5 y 1,5 gramos con precisión de 1 mg previamente molida y tamizada, posteriormente se compacta en forma de pellet, por último, se posiciona en la porta muestra con el filamento consumible en la parte inferior del mismo.

Figura 14 soporte de muestra



Fuente: Fuente propia

Procedimiento

- Preparación de recipiente de agua: se llena el recipiente con agua destilada a 25°C hasta llegar al nivel indicado en el mismo.
- Preparación de la muestra: Se ubica la muestra previamente depositada en la porta muestra metálico bajo el alambre de encendido en el cual se amarrará el filamento consumible.
- Carga con oxígeno: una vez preparada la muestra, se introducirá en el recipiente de combustión, donde después de sellarlo, se introducirá oxígeno puro ($\geq 99,5\%$) hasta llegar a una presión de 450 psi.
- Ejecución del ensayo: Una vez completada la preparación se procede a introducir la masa de la muestra con precisión de $\pm 0,1$ mg, se inicia el proceso de combustión y por último se toma el dato del poder calorífico superior arrojado por el equipo y se retira la porta muestra con las cenizas producto de la combustión.
- Calibración: se lleva a cabo mediante un ensayo con el ácido benzoico al inicio y otro al finalizar la toma de datos experimentales, con el objetivo de verificar la desviación de los datos arrojados por la bomba calorimétrica.

4.4.2 Cálculo teórico Poder Calorífico Superior (PCS)

Existen maneras de determinar el poder calorífico superior de la biomasa con base en el análisis próximo del mismo. Según PARIKH et al. (2005) es posible calcular un aproximado del poder calorífico superior mediante el contenido de cenizas y material volátil de la muestra a evaluar.

$$HHV = 76,56 - 1,3 * (VM + ASH) + 7,03 \times 10^{-3} * (VM + ASH)^2 \quad (5)$$

HHV: Poder calorífico superior

VM: Material volátil

ASH: Cenizas

4.4.2 Calculo teórico de Poder Calorífico Inferior (PCI)

El poder calorífico inferior se refiere al calor real que se obtiene durante la combustión despreciando la energía de condensación del agua y otros factores como el hidrogeno.

Según SOKHANSANJ (2011), podemos determinar el poder calorífico inferior mediante la siguiente formula.

$$LHV = HHV(1 - Mad) - 2,447Mad \quad (6)$$

Mad: Contenido de humedad

LHV: Poder calorífico inferior

HHV: Poder calorífico superior

4.5 PELLETT

4.5.1 Producción del pellet

Tomando como referencia la norma ISO 17225-6:2022, donde se plantean las dimensiones de los pellets de biomasa no leñosas (herbáceas, frutos, biomasa acuática, mezclas, etc.), en la cual se plantean las dimensiones permisibles para los pellets de esta categoría, dando diámetros de 6 a 25mm y longitudes de 3,15 a 50mm, se optó por un pellet de diámetro 13,5mm y longitud de 7mm.

Equipos

- Dado metálico (D=13,5mm).
- Prensa hidráulica de accionamiento manual con manómetro.

Procedimiento

- Llenar el dado con el material torrefacto, de 1,3 a 1,5 gramos aproximadamente.

- Posicionar el dado cagado en la prensa y bombear manualmente hasta alcanzar 2 toneladas en la prensa, el equivalente a 145 psi en el dado del pellet.
- Retirar el pellet y limpiar restos de biomasa del dado.

Figura 15 soporte de muestra



Fuente: Fuente propia

4.5.2 Análisis de durabilidad del pellet

El ensayo de durabilidad del pellet se llevó a cabo bajo el ensayo de caída (Drop Test) referenciado en la norma ASTM D440-07.

Equipos

- Plataforma de caída ($1,85\text{m} \pm 0,05\text{m}$).
- Superficie de impacto rígida.
- Balanza analítica con presión de $\pm 0,1 \text{ mg}$.

Procedimiento

- Se toma el peso del pellet antes de realizar el ensayo con una precisión de 0,1 mg.
- Se posiciona la muestra sobre la plataforma de caída a 1,85 metros sobre la superficie de impacto.

- Posterior al impacto se recoge el material del pellet con tamaño superior a 3,5 mm y se pesa con una precisión de 0,1 mg.

Cálculo

El cálculo de la integridad del pellet se toma como la razón entre la masa del material recuperado después de la prueba y la masa inicial del pellet.

$$I = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (7)$$

I: Integridad del pellet

M_f : Masa del material recuperado

M_i : Masa inicial del pellet

4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO MINITAB

Para realizar el estudio estadístico de las variables del análisis próximo se recurrió al uso del software estadístico Minitab, con el cual se determinó la influencia de las variables matriciales sobre cada parámetro determinado mediante los ensayos experimentales, además de buscar un modelado de una ecuación que permita expresar el comportamiento de cada variable en función de los parámetros definidos (temperatura y tiempo) con el fin de predecir el comportamiento de la biomasa en punto fuera de la matriz para realizar el análisis de su rendimiento energético.

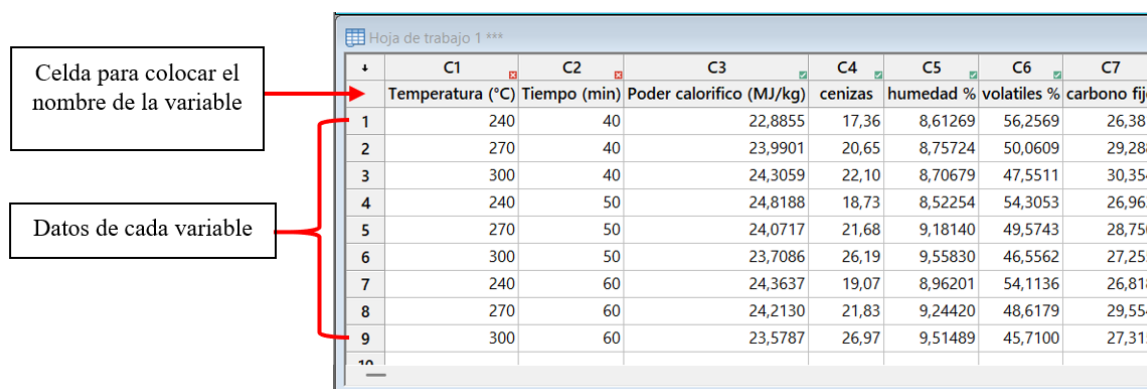
Para realizar este proceso el software Minitab brinda múltiples herramientas de regresión y modelado de las cuales se seleccionaron 3: diseño factorial y análisis de Pareto, regresión de modelo lineal y agrupación mejores subconjuntos.

4.6.1 Diseño factorial y análisis de Pareto.

Esta herramienta de Minitab permite definir un diseño factorial en función de las variables a estudiar sin un límite, dentro de este diseño el software brinda un diagrama de Pareto de efectos estandarizado que permite observar la influencia de cada variable matricial sobre las variables estudiadas permitiendo a su vez determinar si una variable es significativa, además de esto este mismo análisis entrega una ecuación que se ajusta con cierto nivel de precisión del comportamiento de los datos entregados.

Para usar esta y cualquier otra herramienta de Minitab el primer paso es introducir los datos estadísticos a estudiar cómo se observa en la *Figura 16*.

Figura 16 Hoja de trabajo para introducir datos



Celda para colocar el nombre de la variable

Datos de cada variable

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
1	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Poder calorífico (MJ/kg)	cenizas	humedad %	volátiles %	carbono fijo
2	240	40	22,8855	17,36	8,61269	56,2569	26,381
3	270	40	23,9901	20,65	8,75724	50,0609	29,288
4	300	40	24,3059	22,10	8,70679	47,5511	30,354
5	240	50	24,8188	18,73	8,52254	54,3053	26,963
6	270	50	24,0717	21,68	9,18140	49,5743	28,750
7	300	50	23,7086	26,19	9,55830	46,5562	27,255
8	240	60	24,3637	19,07	8,96201	54,1136	26,818
9	270	60	24,2130	21,83	9,24420	48,6179	29,554
10	300	60	23,5787	26,97	9,51489	45,7100	27,315

Fuente: Minitab

Luego de introducir los datos se busca en el menú superior la opción “Estadísticas” como se observa en la *Figura 17*.

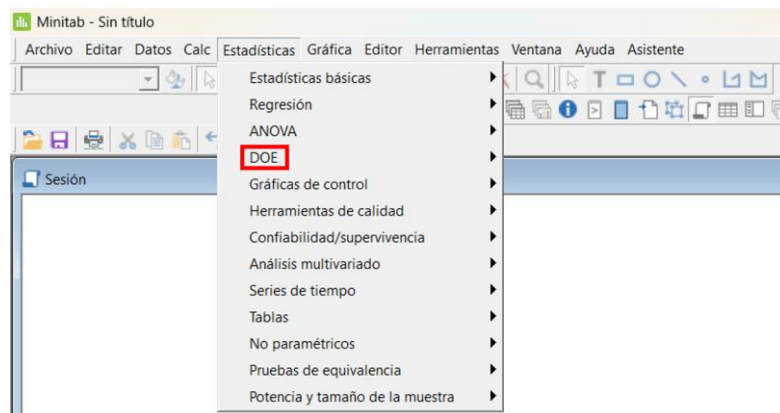
Figura 17 Menú de herramientas Minitab



Fuente: Minitab

Luego de seleccionar la herramienta de “Estadísticas” se despliega un menú con múltiples herramientas, se debe seleccionar la herramienta “DOE” como se muestra en la *Figura 18*.

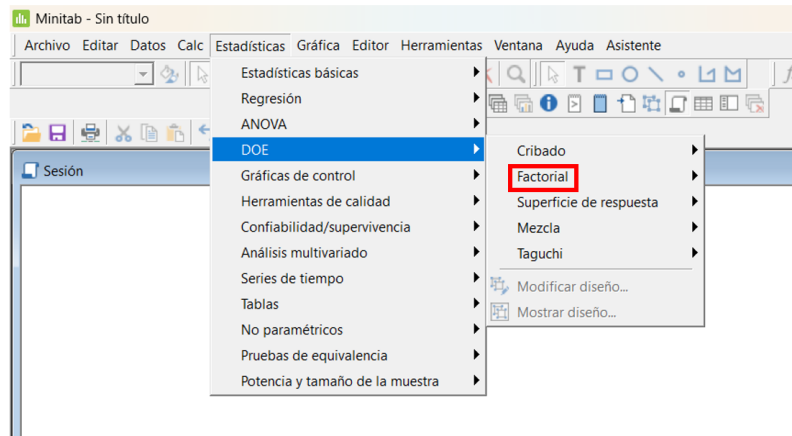
Figura 18 Menú herramientas de estadística.



Fuente: Minitab

Posteriormente a seleccionar la herramienta “DOE” se despliega un nuevo menú de herramientas, en el que se debe seleccionar “Factorial”, como se puede apreciar en la *Figura 19*.

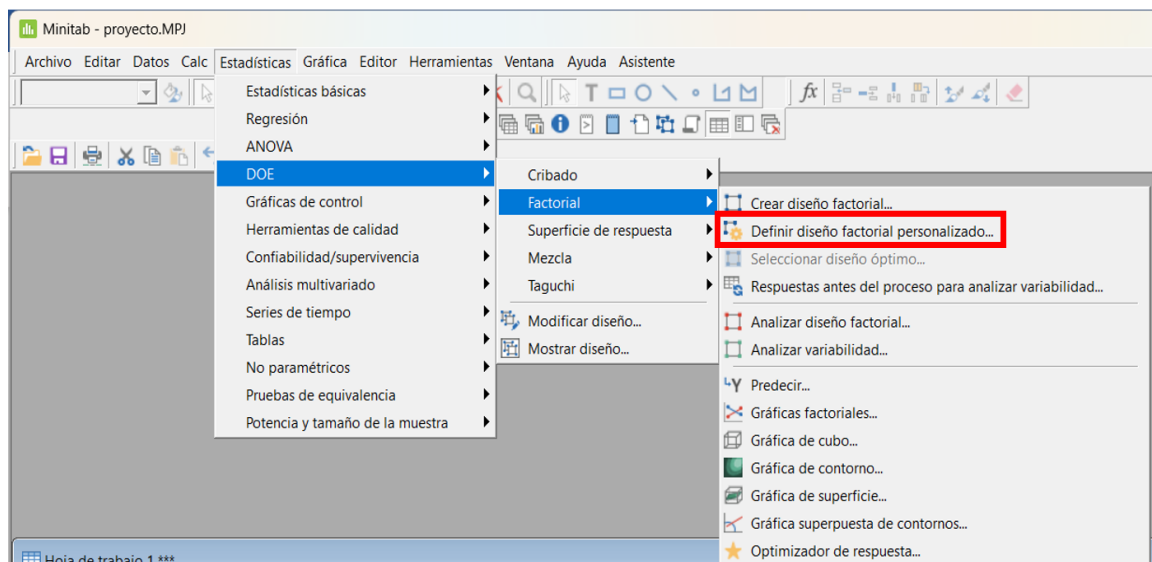
Figura 19 Menú herramientas de DOE.



Fuente: Minitab

Luego de seleccionar “Factorial” se despliega un menú en el cual se debe buscar la opción “definir diseño factorial personalizado”, como se puede apreciar en la *Figura 20*.

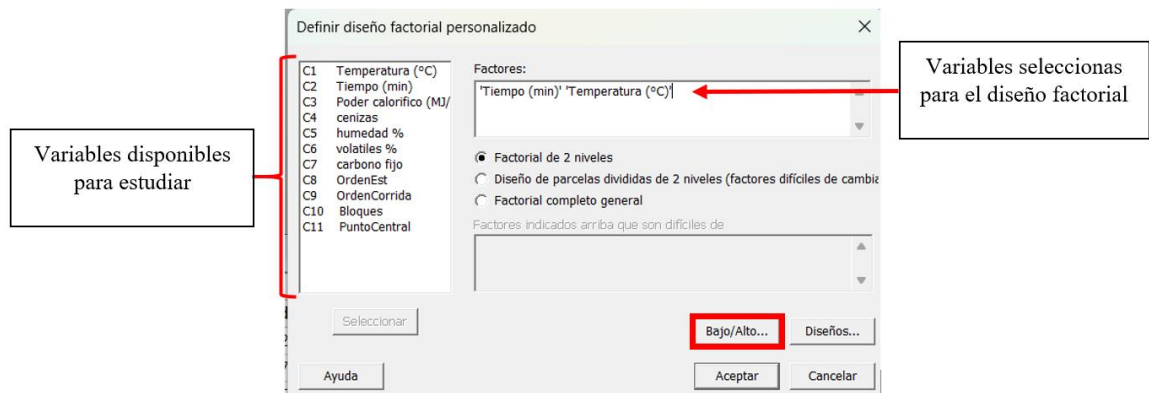
Figura 20 Menú herramientas de factorial



Fuente: Minitab

Luego de seleccionar la opción de definir diseño, se abre una nueva venta en la cual se deben seleccionar las variables que se quieran comparar con el resto para determinar su significación o su nivel de impacto, estas variables harán parte del diseño factorial definido, en el caso de este proyecto son las variables temperatura y tiempo, posteriormente se presiona en el botón “Bajo/Alto” para desplegar una nueva venta como se puede apreciar en la *Figura 21*.

Figura 21 Menú herramientas de factorial.



Fuente: Minitab

Al momento de presionar el botón “Bajo/Alto se abre una nueva ventana a la cual solo se debe dar aceptar y nuevamente aceptar como se aprecia en las *Figura 7 y 8*

Figura 22 Menú diseño factorial personalizado “Bajo/Alto”.

Factor	Nombre	Tipo	Bajo	Alto
A	Temperatura	Numérico	240	300
B	Tiempo (min)	Numérico	40	60

Los datos de la hoja de trabajo están

Codificados

No codificados

Ayuda **Aceptar** Cancelar

Fuente: Minitab

Figura 23 Menú diseño factorial.

Definir diseño factorial personalizado

C1 Temperatura (°C)
C2 Tiempo (min)
C3 Poder calorífico (MJ)/
C4 cenizas
C5 humedad %
C6 volátiles %
C7 carbono fijo
C8 OrdenEst
C9 OrdenCorrida
C10 Bloques
C11 PuntoCentral

Factores:
"Temperatura (°C)" "Tiempo (min)"

Factorial de 2 niveles
 Diseño de parcelas divididas de 2 niveles (factores difíciles de cambiar)
 Factorial completo general

Factores indicados arriba que son difíciles de

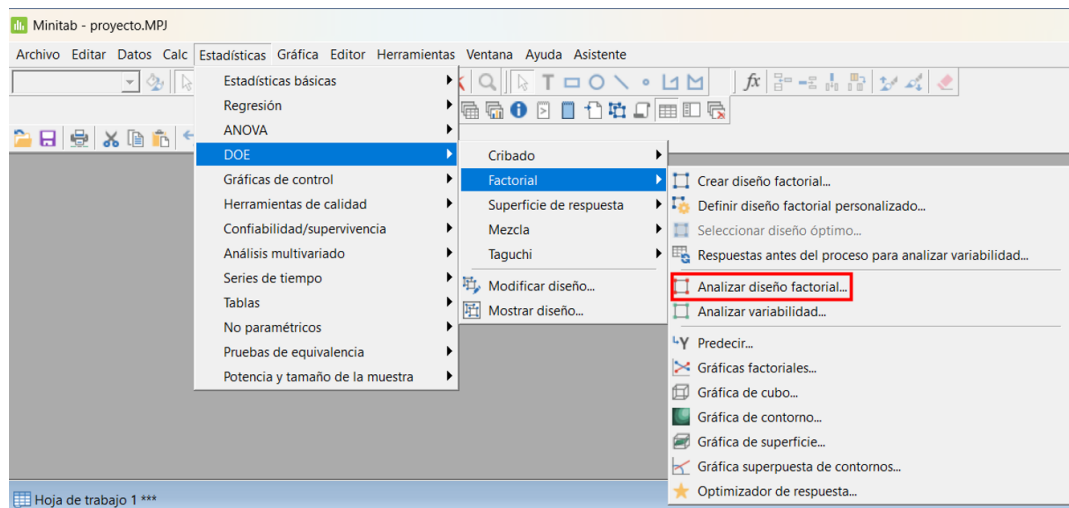
Seleccionar Bajo/Alto... Diseños...

Ayuda **Aceptar** Cancelar

Fuente: Minitab

Posteriormente se repiten los pasos que se aprecian en las *Figuras 17, 18 y 19* y se selecciona la opción “Analizar diseño factorial” como se aprecia en la *Figura 24*

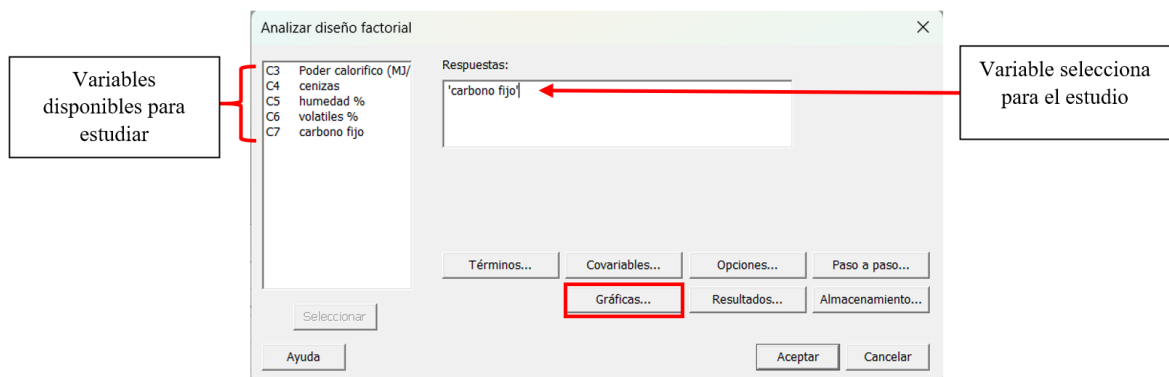
Figura 24 Selección herramienta “analizar diseño”.



Fuente: Minitab

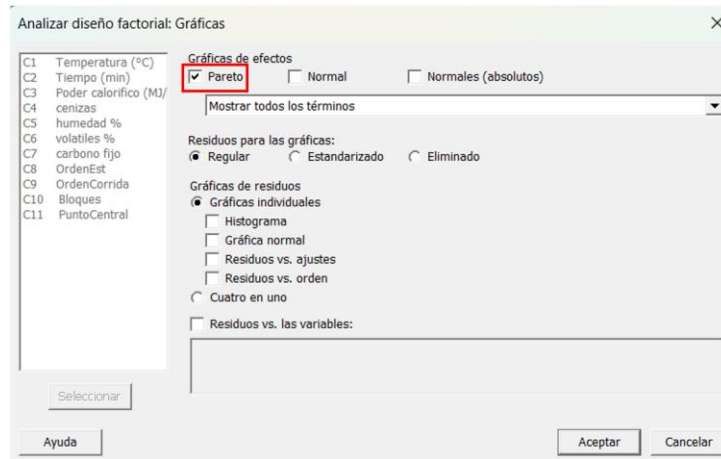
Al seleccionar la herramienta que se aprecia en la *Figura 24* se despliega una nueva ventana en la cual se debe seleccionar la variable que se quiere estudiar en función de las variables que se definieron al momento de realizar el diseño factorial personalizado, como se puede apreciar en la *Figura 25*, es importante antes de oprimir el botón aceptar, darle al botón de gráficas, para que se despliegue una nueva ventana en donde se debe confirmar que en el apartado de graficas este seleccionado Pareto como se aprecia en la *Figura 26*.

Figura 25 Herramienta análisis de diseño factorial.



Fuente: Minitab

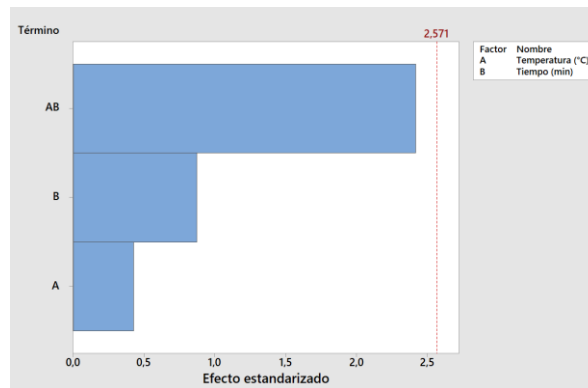
Figura 26 Graficas herramienta de análisis diseño factorial



Fuente: Minitab

Finalmente, Minitab arroja el diagrama de Pareto y le ecuación para la variable seleccionada como se aprecia en las Figuras 27 y 28.

Figura 27 Ejemplo de Pareto.



Fuente: Minitab

Figura 28 Ejemplo resultados de Minitab.

Regresión factorial: carbono fijo vs. Temperatura (°C); Tiempo (min)

* NOTA * Los datos en la hoja de trabajo no parecen coincidir con la columna de puntos centrales.

* NOTA * Este diseño incluye algunas corridas divergentes.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	7,7102	2,5701	1,51	0,321
Lineal	2	4,6903	2,3451	1,37	0,335
Temperatura (°C)	1	3,7812	3,7812	2,22	0,197
Tiempo (min)	1	0,9091	0,9091	0,53	0,498
Interacciones de 2 términos	1	3,0199	3,0199	1,77	0,241
Temperatura (°C)*Tiempo (min)	1	3,0199	3,0199	1,77	0,241
Error	5	8,5331	1,7066		
Total	8	16,2432			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,30637	47,47%	15,95%	0,00%

Coefficientes codificados

Término	Efecto	EE del		Valor T	Valor p	FIV
		Coef	coef.			
Constante		28,075	0,435	64,47	0,000	
Temperatura (°C)	1,588	0,794	0,533	1,49	0,197	1,00
Tiempo (min)	-0,779	-0,389	0,533	-0,73	0,498	1,00
Temperatura (°C)*Tiempo (min)	-1,738	-0,869	0,653	-1,33	0,241	1,00

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\text{carbono fijo} = -16,2 + 0,171 \text{ Temperatura (°C)} + 0,743 \text{ Tiempo (min)} - 0,00290 \text{ Temperatura (°C)*Tiempo (min)}$$

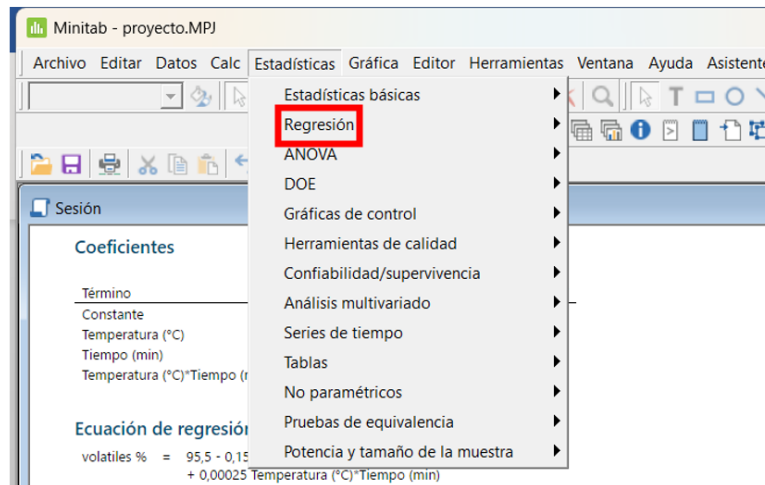
Fuente: Minitab

4.6.2 Regresión de modelo lineal

Esta herramienta permite determinar el modelo que mejor se ajuste a los parámetros seleccionados, para este caso temperatura y tiempo, pero se limita únicamente a entregar el modelo, aunque se puede configurar para determinar el diagrama de Pareto igual que el caso anterior, este Pareto diferirá en gran medida con el anterior método debido a que el modelo de cálculo es distinto, por tanto, se recomienda usar el método anterior para determinar el diagrama de Pareto.

Para emplear este método se debe repetir los pasos especificados en la *Figura 17*, luego se debe seleccionar la opción regresión, como se puede apreciar en la *Figura 29*.

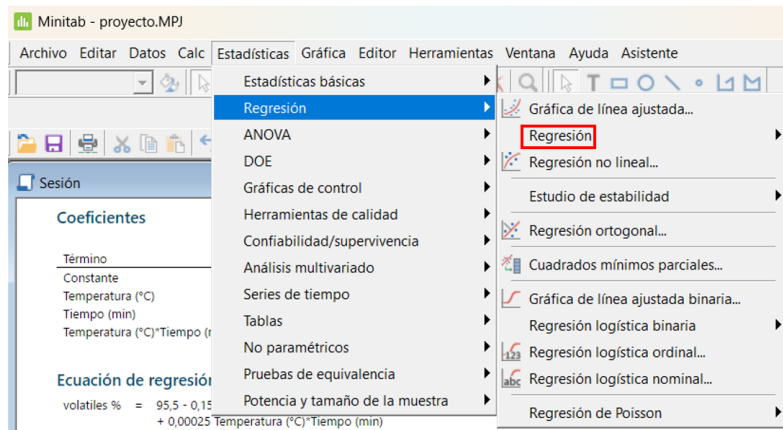
Figura 29 Menú estadístico regresión lineal.



Fuente: Minitab

Posterior a seleccionar “Regresión” en el menú estadístico se despliega otro menú, se vuelve a seleccionar “Regresión” como se aprecia en la *Figura 30*.

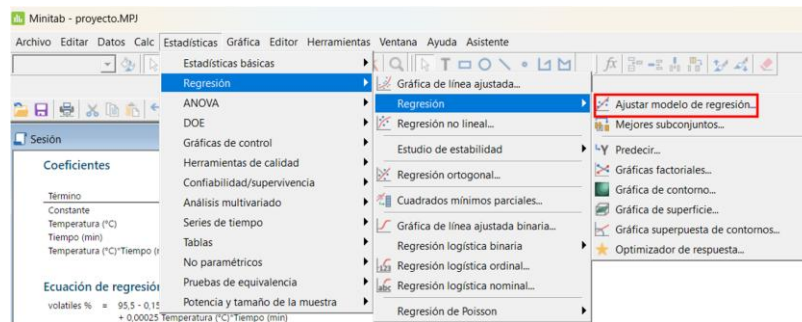
Figura 30 Menú estadístico regresión lineal 2.



Fuente: Minitab

Luego de seleccionar nuevamente regresión, se despliega otro menú en el cual se selecciona “Ajustar modelo de regresión”, como se observa en la *Figura 31*.

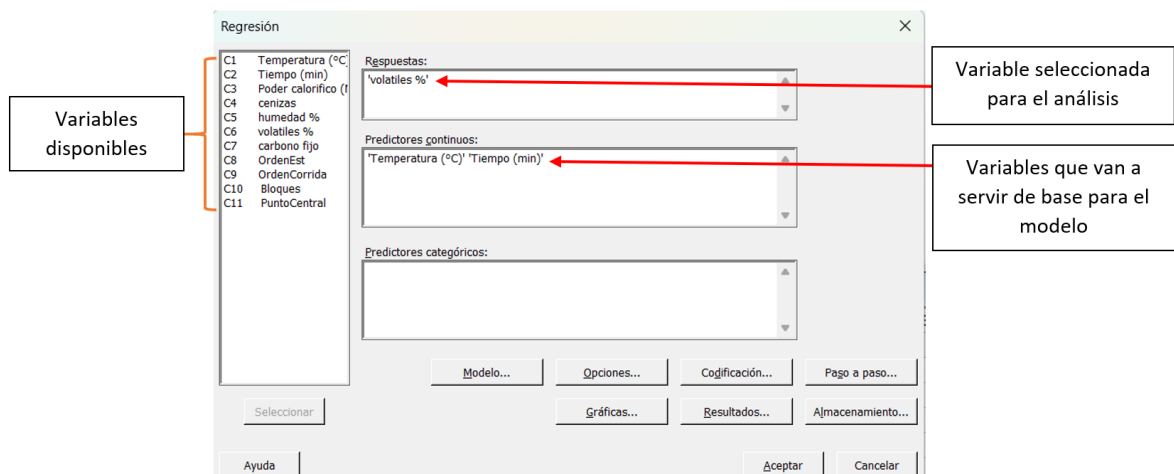
Figura 31 herramienta Ajuste modelo de regresión.



Fuente: Minitab

Al momento de seleccionar esta opción se despliega una nueva ventana en la cual se seleccionan las variables a las cuales se les quieren realizar el análisis y las variables que van a ser evaluadas en este análisis como se observa en la *Figura 32*, finalmente se le da al botón aceptar y se obtendrán los resultados como se observa en la *Figura 33*.

Figura 32 Ajuste modelo de regresión.



Fuente: Minitab

Figura 33 Ejemplo resultados regresión lineal.

Análisis de regresión: cenizas vs. Temperatura (°C); Tiempo (min)

Selección de términos escalonada

α a entrar = 0,15; α a retirar = 0,15

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	2	77,348	38,674	36,35	0,000
Temperatura (°C)	1	67,304	67,304	63,25	0,000
Tiempo (min)	1	10,044	10,044	9,44	0,022
Error	6	6,384	1,064		
Total	8	83,732			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,03153	92,38%	89,83%	80,02%

Coefficientes

Término	Coef	EE del		Valor p	FIV
		coef.	Valor T		
Constante	-14,99	4,35	-3,45	0,014	
Temperatura (°C)	0,1116	0,0140	7,95	0,000	1,00
Tiempo (min)	0,1294	0,0421	3,07	0,022	1,00

Ecuación de regresión

cenizas = -14,99 + 0,1116 Temperatura (°C) + 0,1294 Tiempo (min)

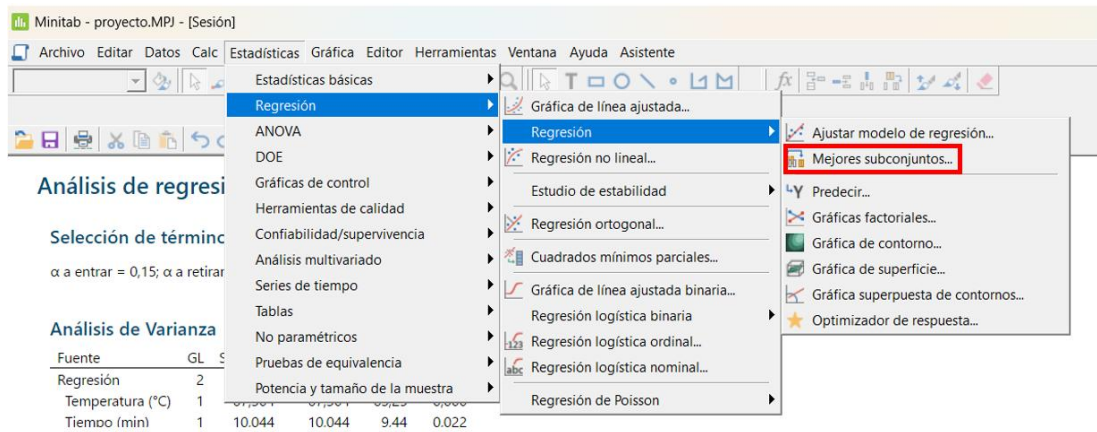
Fuente: Minitab

4.6.3 Agrupación de mejores subconjuntos

Esta herramienta es la última alternativa si ninguno de los dos métodos anteriores brinda un modelo aceptable, en este caso esta herramienta se usa para evaluar una variable entorno a múltiples variables seleccionadas, esto con el fin de encontrar la agrupación de variables que brinde el mejor modelo, pero sin entregar una ecuación como tal, para encontrar dicho modelo se debe recurrir a cualquiera de los métodos anteriores.

Para hacer uso de este método, se requiere realizar los pasos mencionados en las *Figuras 29 y 30*, luego de realizar estos pasos se selecciona la opción “mejores subconjuntos” como se aprecia en la *Figura 34*.

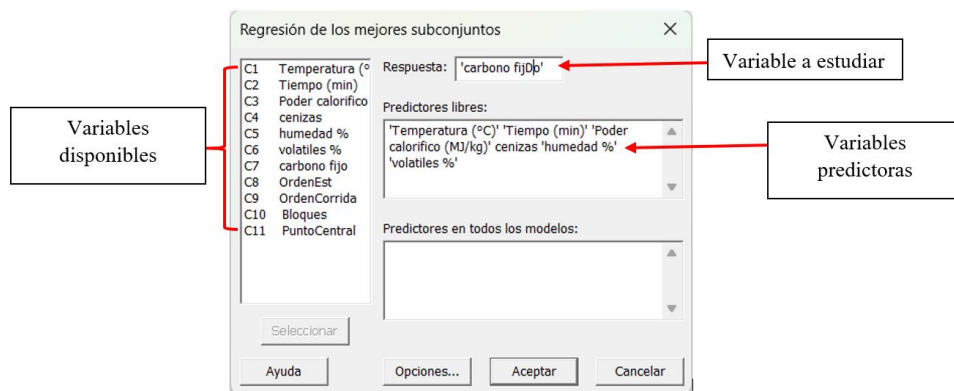
Figura 34 Herramientas mejores subconjuntos.



Fuente: Minitab

Al seleccionar los “Mejores subconjuntos” se abrirá una nueva ventana en donde se selecciona la variable a estudiar y todas las variables con las que se quiere estudiar como se aprecia en la *Figura 35*, luego se presiona el botón aceptar para arrojar los resultados como se aprecia en la *Figura 36*.

Figura 35 Mejores subconjuntos.



Fuente: Minitab

Figura 36 Ejemplo resultados mejores subconjuntos.

Regresión de los mejores subconjuntos: Poder calorífico ... volátiles %

la respuesta es Poder calorífico (MJ/kg)

Vars	R-cuad.	R-cuad. (ajust)	R-cuad. (pred.)	Cp de Mallows	S	T e m p e r a t u r a (° C)	T o c m t e e i (n d l m i a e i z d s)	v o l a t i l e s %	h l u a t %
1	6,4	0,0	0,0	2,9	0,57232	X			
1	4,8	0,0	0,0	3,1	0,57736		X		
2	29,1	5,4	0,0	3,0	0,53833	X	X		
2	16,0	0,0	0,0	4,1	0,58578	X		X	
3	57,7	32,4	0,0	2,6	0,45525	X	X	X	
3	53,6	25,7	0,0	2,9	0,47700	X		X	X
4	64,6	29,1	0,0	4,0	0,46596	X	X	X	X
4	59,3	18,6	0,0	4,5	0,49937	X	X	X	X
5	64,7	5,8	0,0	6,0	0,53720	X	X	X	X

Fuente: Minitab

4.7 ANÁLISIS ENERGÉTICO

4.7.1 Determinación del consumo energético del proceso de torrefacción

Debido al tipo de control implementado en el reactor utilizado, el cual es ON/OFF, calcular el consumo energético del reactor durante el proceso de torrefacción no es viable, por lo cual se decidió determinar este mismo mediante el uso de un Wattímetro digital que opere a 110V, a 15Amp y frecuencia de 45 a 65Hz.

Procedimiento:

- Conectar el Wattímetro digital entre el punto eléctrico y la toma del reactor.
- Iniciar el proceso de torrefacción y realizar la toma de datos de consumo durante la etapa de calentamiento, etapa de residencia de la muestra y el consumo total del ensayo.
- Registrar los consumos promedio de calentamiento y residencia en función de las temperaturas evaluadas.

Calculo:

Determinar el consumo promedio de calentamiento teniendo en cuenta el consumo total del proceso y el tiempo de este.

$$EP_C = \frac{E_c}{T_C} \quad (8)$$

EP_C : Energía promedio de calentamiento por minuto

E_c : Energía total de calentamiento

T_C : Tiempo de calentamiento

Determinar el consumo promedio de residencia teniendo en cuenta el consumo total del proceso y el tiempo de este.

$$EP_R = \frac{E_R}{T_R} \quad (9)$$

EP_R : Energía promedio de calentamiento por minuto

E_R : Energía total de residencia

T_R : Tiempo de calentamiento

Determinar la energía consumida durante el proceso de torrefacción mediante la suma de la energía total de calentamiento y la total de residencia.

$$ET = EP_R \times T_R + EP_R \times T_R \quad (10)$$

$$ET = E_C + E_R \quad (11)$$

ET: Energía consumida durante la torrefacción.

EP_C: Energía promedio de calentamiento por minuto

EP_C: Energía promedio de calentamiento por minuto

E_C: Energía total de calentamiento

T_C: Tiempo de calentamiento

E_C: Energía total de calentamiento

T_C: Tiempo de calentamiento

Determinar el consumo de energía en MJ requerido para torrefactar un kilogramo de biomasa in natura.

$$ET_{kg} = \frac{ET \times 3.6}{MM} \quad (12)$$

ET_{kg}: Energía consumida durante la torrefacción por kilogramo de biomasa in natura

ET: Energía consumida durante la torrefacción.

MM: Masa inicial de la muestra torrefactada.

4.7.2 Análisis de rendimiento energético experimental

El rendimiento energético se plantea como la energía resultante del proceso de torrefacción de la biomasa, esto mediante el contraste del poder calorífico resultante, el rendimiento masico de la torrefacción y la energía consumida.

Parámetros de evaluación:

- Poder calorífico: Se toma el poder calorífico superior (PCS).

- Rendimiento masico: Fracción de masa resultante del proceso térmico en función de la masa in natura.

$$RM = \frac{MT}{MI} \quad (13)$$

RM: Rendimiento masico.

MT: Masa resultante después de la torrefacción.

MI: Masa in natura antes de la torrefacción.

- Energía consumida: Energía consumida durante el proceso de torrefacción en el reactor de pirolisis.

Rendimiento energético en función de kilogramo de masa in natura:

$$RE = (PCS \times RM) - ET_{kg} \quad (14)$$

RE: Rendimiento energético.

PCS: Poder calorífico superior.

RM: Rendimiento masico.

ET_{kg}: Energía consumida durante la torrefacción por kilogramo de biomasa in natura

Poder calorífico superior en función de kilogramo de biomasa in natura:

$$PCS_{kg} = PCS \times RM \quad (15)$$

PCS_{kg}: PCS en función de kilogramo de biomasa in natura.

PCS: Poder calorífico superior.

RM: Rendimiento masico

4.7.3 Análisis de modelos predictivos.

Mediante los modelos obtenidos del análisis de Minitab; cenizas ecuación (11), volátiles ecuación (15) y humedad ecuación (5), se realizarán proyecciones de estas propiedades en los rangos de temperatura permisible de la torrefacción, la cual es de 200 a 320°C y con tiempos de 20 a 60 minutos.

Con los datos obtenidos, se realizará el cálculo teórico del poder calorífico superior PCS usando la ecuación (5), con el fin de identificar de manera local, cual es el ensayo con el mayor poder calorífico superior para las diferentes combinaciones de tiempo y temperatura de torrefacción. Finalmente se determinará el error entre los datos teóricos y sus respectivas contrapartes calculadas de manera teórica, mediante el uso de la ecuación (16)

$$\%E = \frac{PCS_{Exp} - PCS_{Teo}}{PCS_{Exp}} \quad (16)$$

$\%E$: Porcentaje de error entre el PCS experimental y calculado.

PCS_{Exp} : PCS obtenido del ensayo en la bomba calorimétrica.

PCS_{Teo} : PCS obtenido de manera teórica.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE HUMEDAD

Tabla 3 Resultado ensayo de humedad

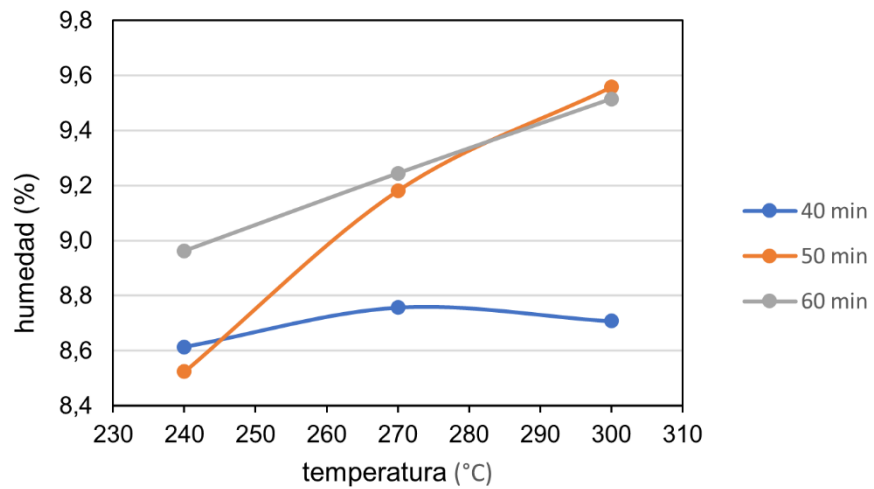
Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Humedad %	Desviación
0	In natura	In natura	12,17	0,25
1	240	40	8,61	0,34
2	270	40	8,76	0,29
3	300	40	8,71	0,42
4	240	50	8,52	0,25
5	270	50	9,18	0,25
6	300	50	9,56	0,21
7	240	60	8,96	0,28
8	270	60	9,24	0,34
9	300	60	9,51	0,35

Fuente: Fuente Propia

Como se puede apreciar en la *Tabla 3*, los resultados obtenidos de la prueba de humedad para las muestras torrefactadas rondan entre 8,6 y 9,6%, en contraste el ensayo 0 que corresponde a la muestra in natura contiene un 12,17% de humedad, siendo aproximadamente 1,27 veces más grande que el valor máximo de humedad obtenido de las muestras torrefactas.

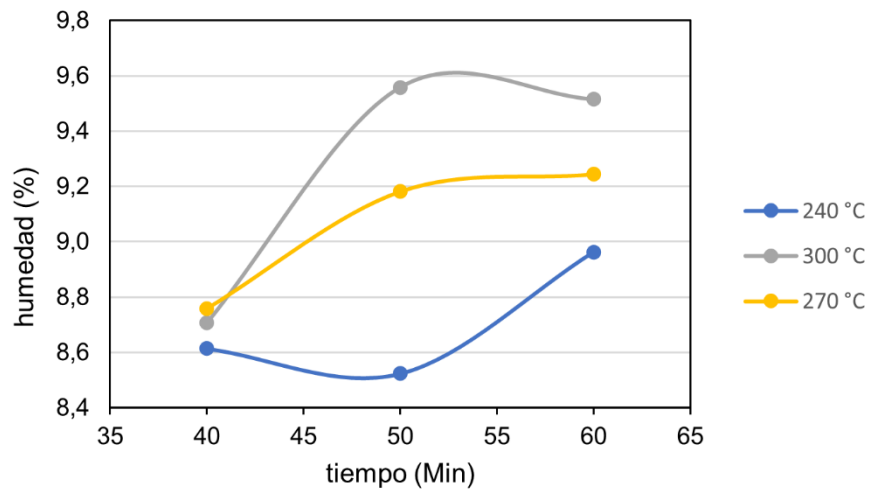
Según lo planteado en la metodología, cada ensayo se realizó a partir de una matriz de 3x3 que combina las variables de temperatura y tiempo para las muestras torrefactadas, por tanto, resulta importante contrasta el comportamiento las variables caracterizadas frente a estas dos variables.

Figura 37 Humedad VS Temperatura para cada tiempo



Fuente: Fuente propia

Figura 38 Humedad VS Tiempo para cada temperatura



Fuente: Fuente propia

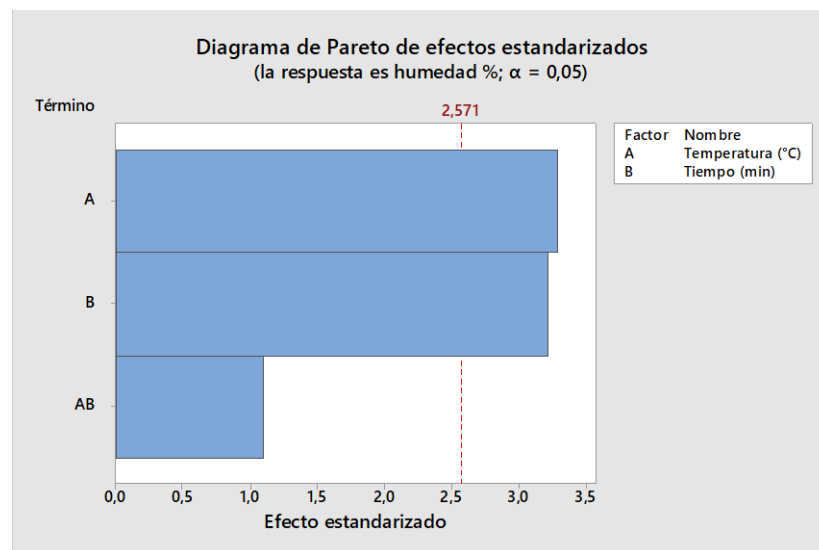
En la *Figura 37* se presenta el comportamiento de la humedad en función de la temperatura para cada intervalo de tiempo, como se puede observar la tendencia para 50 y 60 minutos es

creciente mientras que para 40 minutos es decreciente, esto discrepa de los resultados esperados, demostrando la presencia de ruido en los resultados obtenidos.

En la *Figura 38* se observa el comportamiento de la humedad frente al tiempo para cada nivel de temperatura. En este caso, las curvas presentes tienden a ser más aleatorias, pero manteniéndose dentro de un rango específico (8,5 y 9,6%), es decir que para cada caso el comportamiento es aleatorio, pero manteniendo un límite común, esto se debe al ruido mencionado anteriormente mientras que el límite común demuestra la tendencia de la humedad a mantenerse constante o con poca variación.

Debido a la presencia de ruido en los resultados obtenidos es difícil analizar la importancia de cada parámetro establecido sobre la humedad, por lo tanto, resulta necesaria la realización de un diagrama de Pareto que pueda ilustrar el nivel de significancia de cada variable.

Figura 39 Diagrama de Pareto contenido de humedad



Fuente: Fuente Propia (Minitab)

En la *Figura 39* se puede apreciar el diagrama de Pareto realizado para estudiar el nivel de significancia de cada variable y su respectiva interacción con la humedad, en el diagrama se

puede apreciar que el límite crítico se encuentra en 2,571 esto quiere decir que cualquier variable que sea inferior a este límite será no significativa mientras que las variables que toquen o sobrepasen este límite serán variables significativas, además mientras más lejos se encuentre dichas variables del límite serán más o menos significativas, en este orden de ideas, tanto la temperatura como el tiempo son variables significativas mientras que la interacción entre ellas es no significativa, cabe aclarar que aunque la temperatura y el tiempo son significativas no se encuentran tan alejadas del límite, es decir su nivel de significancia no es tan alto, por tanto su impacto sobre la humedad es mínimo.

Además de medir el nivel de importancia de cada variable Minitab permite determinar un modelo que se ajuste a las variables introducidas mediante una regresión factorial.

$$\%Humedad = 10,27 - 0,0098 * Temperatura(^{\circ}C) - 0,0758 * Tiempo(min) + 0,000382 * Temperatura(^{\circ}C) * Tiempo(min) \quad (17)$$

Cada modelo planteado por Minitab tiene su resumen en donde se plantea la precisión que tiene el modelo presentado.

Tabla 4 Precisión de la ecuación 17

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,208833	81,73%	70,76%	14,63%

Fuente: Fuente Propia (Minitab)

S: error estándar de la estimación

R-cuad: coeficiente de determinación

R-cuad (ajustado): coeficiente de determinación ajustado

R-cuad (pred): coeficiente de determinación predictivo

Analizando la *Tabla 4* se ilustra la precisión con la que cuenta la ecuación (17), en este caso siendo muy baja puesto que cuenta con márgenes de error que superan el 20% y por tanto resultando inviable su uso para un análisis óptimo, por tanto y con ayuda del mismo software se realizó una regresión lineal entre las variables despreciando la interacción entre ellas en búsqueda de un mejor modelo.

$$\%Humedad = 5,112 + 0,00935 * Temperatura(^{\circ}C) + 0,02741 * Tiempo(min) \quad (18)$$

Tabla 5 Precisión de la ecuación 18

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,212397	77,32%	69,76%	44,52%

Fuente: Fuente Propia (Minitab)

En la *Tabla 5* se observar la precisión de la ecuación (18), en donde se aprecia un aumento significativo en el coeficiente de determinación predictivo siendo del 30% pero reduciendo ligeramente los demás coeficientes y por tanto resultando aun inviables para un análisis, debido a que analizar la humedad en función de las variables matriciales resulto insuficiente se requirió implementar más variables al análisis en búsqueda de un modelo que tenga una mejor precisión, esto con ayuda de la herramienta “mejores subconjuntos” de Minitab.

En la *Tabla 6* se puede apreciar los mejores subconjuntos encontrados para el análisis de humedad en función de todas las variables estudiadas, para seleccionar un subconjunto que sea viable para el análisis se tienen que tener en cuenta dos factores importantes, el primero y más importante es que los coeficientes de determinación y determinación ajustados deben estar los más cercanos al 90% es decir que el error sea los más cercano al 10%, el segundo factor es que el Cp de Mallows cumpla con la siguiente condición:

Por lo tanto, en la *Tabla 6* se encuentra subrayado con subconjunto que cumple de mejor manera estas 2 condiciones, del cual mediante regresión lineal se puede obtener el mejor modelo para humedad.

$$\%Humedad = 10,31 + 0,01973 * Tiempo(\text{min}) - 0,168 * Poder\ calorifico \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right) + 0,0804 * \%cenizas \quad (20)$$

Tabla 7 Precisión de la ecuación 20

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,151845	90,34%	84,54%	39,59%

Fuente: Fuente Propia (Minitab)

Aunque la precisión de la ecuación (20) mejoro como se puede apreciar en la *Tabla 7*, sigue superando el 10% de error, por lo tanto, no es modelo adecuado para estudiar el comportamiento de la humedad, de esto modo se demuestra que, aunque hallan variables que tengan un cierto nivel de significación sobre la humedad ninguna represente un gran cambio sobre la misma y por tanto sigue siendo un parámetro extrínseco de la biomasa.

5.2 ANÁLISIS DE CENIZAS

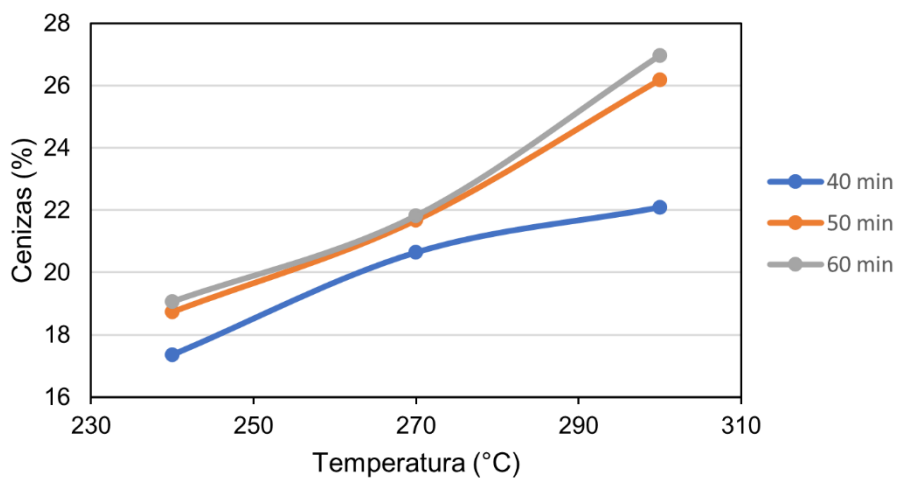
Tabla 8 Resultado ensayo de cenizas

Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Cenizas	Desviación
0	In natura	In natura	10,96%	0,06
1	240	40	17,37%	0,73
2	270	40	20,67%	0,08
3	300	40	22,12%	0,18
4	240	50	18,75%	0,20
5	270	50	21,68%	0,15
6	300	50	26,22%	0,21
7	240	60	19,52%	0,83
8	270	60	21,87%	0,93
9	300	60	26,99%	0,28

Fuente: Fuente propia

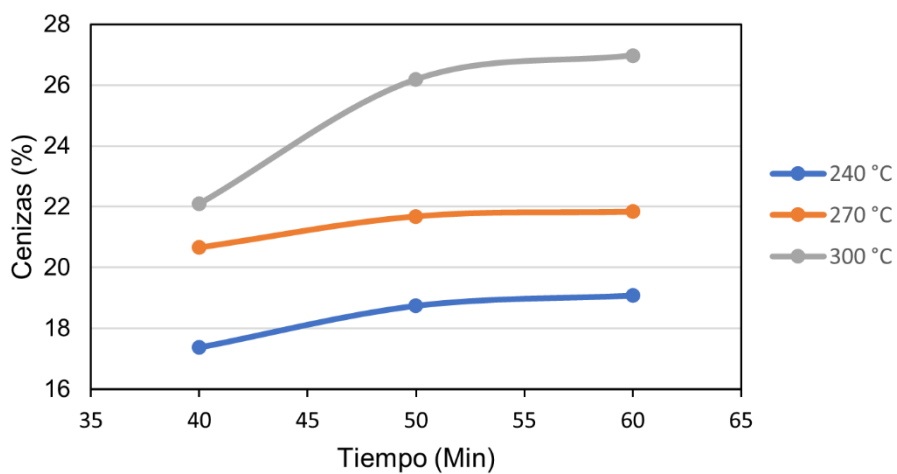
Como se puede apreciar en la *Tabla 8*, los resultados obtenidos de la prueba de cenizas para las muestras torrefactadas rondan entre 17 y 27%, en contraste el ensayo 0 contiene un 10,95% de cenizas, siendo aproximadamente 1,59 veces más grande que el valor mínimo de cenizas obtenido de las muestras torrefactas.

Figura 40 Cenizas VS Temperatura para cada tiempo



Fuente: Fuente Propia

Figura 41 Cenizas VS Tiempo para todas las temperaturas



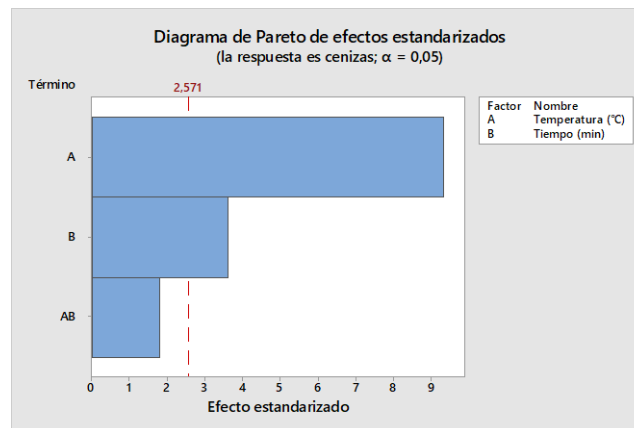
Fuente: Fuente propia

En la *Figura 40* se presenta el comportamiento de las cenizas en función de la temperatura para cada intervalo de tiempo, para todos las gráficas a medida que crece la temperatura aumenta la presencia de cenizas, esto sigue cumpliéndose hasta que alcanzan los 270 °C en donde las líneas pertenecientes a 50 y 60 minutos disparan su crecimiento manteniendo la misma pendiente, mientras que por su parte la gráfica a 40 minutos al llegar a los 270°C disminuyen su tasa de crecimiento alejándose de las otras dos.

En la *Figura 41* se observa el comportamiento de las cenizas frente al tiempo para cada nivel de temperatura. En este caso, las curvas presentes tienen una tendencia creciente en donde la correspondiente a 300°C tiene una mayor pendiente mientras que las otras dos tienen pendientes similares, esto se cumple hasta que llegan a los 50 minutos, en donde a partir de ese punto todas las gráficas tienen a estabilizarse buscando una tendencia lineal constante, cumpliéndose de este modo que a partir de los 50 minutos no importa a que temperatura se aumente no aumentara el porcentaje de cenizas.

Como se pudo apreciar en las *Figuras 40 y 41* las variables matriciales (temperatura y tiempo) son significativas puesto que en ambos casos ambas variables tuvieron una influencia notoria sobre el porcentaje de cenizas de las muestras, por lo tanto, para corroborar esta afirmación y para poder determinar el nivel de significancia y cuál de las dos variables es más importante se requiere realizar un Pareto.

Figura 42 Diagrama de Pareto contenido de cenizas



Fuente: Fuente Propia (Minitab)

En la *Figura 42* se puede apreciar el diagrama de Pareto realizado para estudiar el nivel de significancia de cada variable y su respectiva interacción con las cenizas, en el diagrama se puede apreciar que el límite crítico se encuentra en 2,571, sobre este límite se encuentran la temperatura y el tiempo por lo tanto son variables significativas mientras que la interacción entre ellas se encuentra por debajo del límite por lo tanto no es significativa, cabe aclarar que la temperatura es una variable mucho más significativa que el tiempo, esto se ve respaldado con el análisis de las *Figuras 40 y 41* realizado anteriormente en donde el tiempo en determinado punto deja de influir sobre las cenizas.

Ahora para ver mejor los resultados del Pareto se realizó un modelado que se ajuste a las variables introducidas mediante una regresión factorial o una regresión lineal en búsqueda.

$$\%Cenizas = 20,7 - 0,0206 * Temperatura(^{\circ}C) - 0,585 * Tiempo(min) + 0,00264 * Temperatura(^{\circ}C) * Tiempo(min) \quad (21)$$

Cada modelo planteado por Minitab tiene su resumen en donde se plantea la precisión que tiene el modelo presentado.

Tabla 9 Precisión de ecuación 21

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,879418	95,38%	92,61%	81,91%

Fuente: Fuente Propia

En la *Tabla 9* se ilustra la precisión con la que cuenta la ecuación (21), en este caso el modelo tiene una precisión alta, que cuenta con márgenes de error menores al 10%, en los coeficientes determinante y ajustado pero que llegan al 18% para el coeficiente predictivo, que, aunque no resulte tan determinante se puede buscar un mejor ajuste, para ello, con ayuda del mismo software se realizó una regresión lineal entre las variables despreciando la interacción entre ellas en búsqueda de un mejor modelo.

$$\%Cenizas = -14,99 + 0,1116 * Temperatura (^{\circ}C) + 0,1294 * Tiempo(min) \quad (22)$$

Tabla 10 Precisión de ecuación 22

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,03153	92,38%	89,83%	80,02%

Fuente: Fuente Propia

En el modelo dado por la ecuación (22) y la *Tabla 10*, se puede apreciar que la precisión disminuyó considerablemente comparada con el modelo dado por la ecuación (20) por tanto al desprejar las interacciones entre ambas variables el modelo empeora por tanto no resulta viable el uso del modelo dado por la ecuación (21), para buscar una mejora en el coeficiente predictivo se requirió implementar más variables al análisis, esto fue posible con ayuda de la herramienta “mejores subconjuntos” de Minitab.

Tabla 11 Subconjuntos de variables para asociadas a las cenizas

Vars	R-cuad.	R-cuad. (ajust)	R-cuad. (pred.)	Cp de Mallows	S	T e m p o (m i k i n g)	P C S (M J / k g)	C h l u a m e i d e s	v o l u m e n %	%
1	87,9	86,2	79,8	3,0	1,2010					X
1	80,4	77,6	63,2	8,0	1,5320	X				
2	94,8	93,1	85,3	0,4	0,85007	X			X	
2	93,0	90,6	87,0	1,6	0,99050				X	X
3	95,4	92,6	77,1	2,1	0,87913	X	X		X	
3	95,0	92,1	76,9	2,3	0,91172	X		X	X	
4	95,4	90,9	61,4	4,0	0,97607	X	X		X	X
4	95,4	90,8	60,9	4,1	0,98265	X	X	X	X	
5	95,5	87,9	27,3	6,0	1,1253	X	X	X	X	X

Fuente: Fuente Propia

En la *Tabla 11* se encuentra subrayado con subconjunto que cumple de mejor manera estas las dos condiciones mencionadas en el análisis de humedad, del cual mediante regresión lineal se puede obtener el mejor modelo para humedad.

$$\%Cenizas = -30,59 + 0,0831 * Temperatura (^{\circ}C) + 0,0458 * Tiempo(min) + 3,05 * \%humedad \quad (23)$$

Tabla 12 Precisión de ecuación 23

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,879129	95,38%	92,62%	77,06%

Fuente: Fuente Propia

En la *Tabla 12* se aprecia que la precisión de la ecuación (23) mejoro comparada con la ecuación (22), pero sigue siendo inferior al modelo dado por la ecuación (23), por tanto, el modelo que mejor modela el comportamiento de las cenizas en función de todas las variables planteadas es la ecuación (21).

5.3 ANÁLISIS DE VOLÁTILES

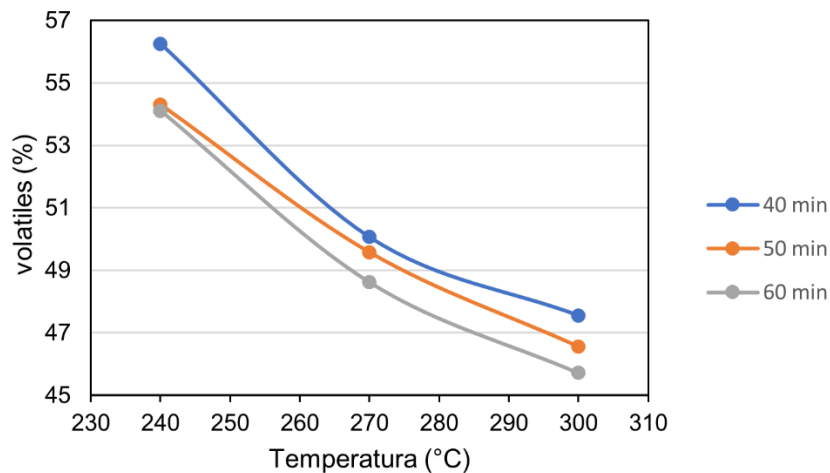
Tabla 13 Resultados ensayo de volátiles

Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Volátiles %	Desviación
0	In natura	In natura	79,1012334	0,232160895
1	240	40	56,25689233	1,209327437
2	270	40	50,06091202	0,890552969
3	300	40	47,5510546	0,536457141
4	240	50	54,30527959	0,807790286
5	270	50	49,57434751	0,716793563
6	300	50	46,5561729	0,450363894
7	240	60	54,11355349	0,728406465
8	270	60	48,61794191	0,619997742
9	300	60	45,71000129	0,346454018

Fuente: Fuente Propia

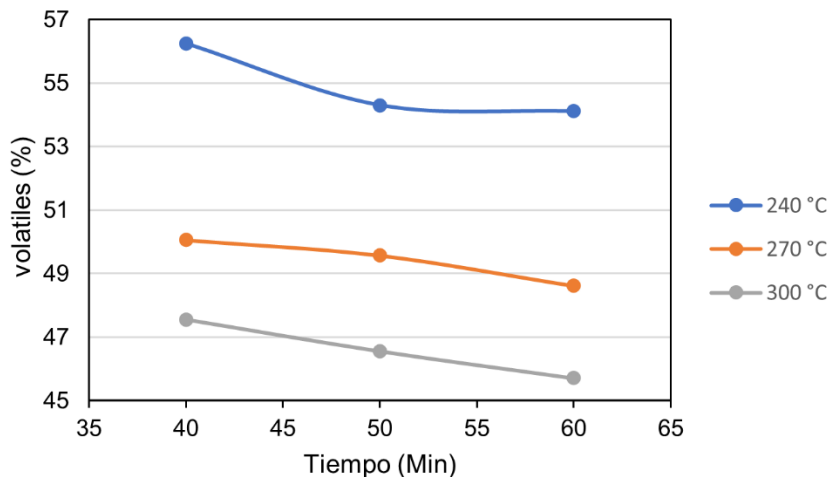
Como se puede apreciar en la *Tabla 13*, los resultados obtenidos de la prueba de volátiles para las muestras torrefactadas rondan entre 45 y 57%, en contraste el ensayo 0 contiene un 79,10% de cenizas, siendo aproximadamente 1,4 veces más grande que el valor máximo de volátiles obtenido de las muestras torrefactas.

Figura 43 Volátiles VS Temperatura para cada tiempo



Fuente: Fuente Propia

Figura 44 Volátiles VS Tiempo para todas las temperaturas



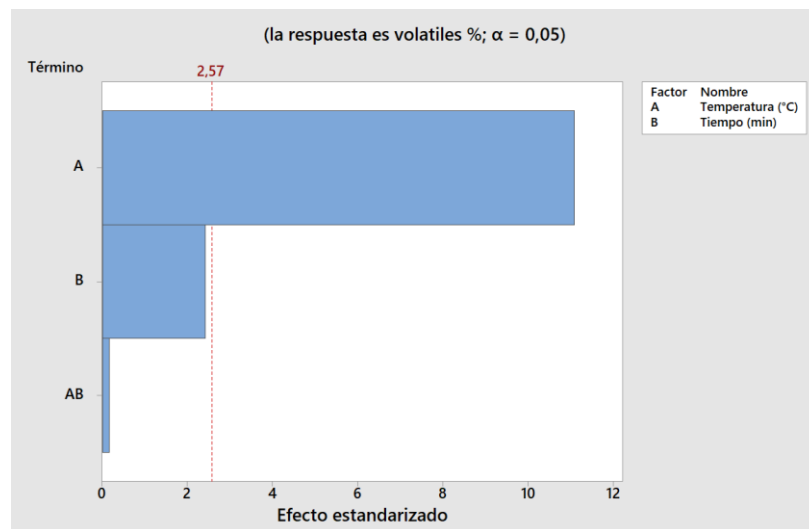
Fuente: Fuente Propia

En la *Figura 43* se representa el comportamiento de los volátiles en función de la temperatura para cada intervalo de tiempo, para todas las gráficas a medida que crece la temperatura disminuye la presencia de volátiles, esto sigue cumpliéndose durante todo el rango de trabajo, discrepando ligeramente en la pendiente de cada lineal.

En la *Figura 44* se observa el comportamiento de los volátiles frente al tiempo para cada nivel de temperatura. En este caso, las curvas presentes tienen una tendencia decreciente, con una pendiente en todos los casos muy pequeña, casi constante, por tanto, sin importar a que temperatura se trabaje, el tiempo es una variable que tiene una influencia muy pequeña sobre los volátiles.

Como se pudo apreciar en las *Figuras 43 y 44* las variables matriciales (temperatura y tiempo) son significativas puesto que en ambos casos ambas variables tuvieron una influencia sobre el porcentaje de volátiles de las muestras, pero con la salvedad de que la influencia del tiempo es muy pequeña, por lo tanto, para corroborar esta afirmación y poder determinar el nivel de significancia y cuál de las dos variables es más importante se requiere realizar un Pareto.

Figura 45 Diagrama de Pareto contenido de volátiles



Fuente: Fuente propia (minitab)

En la *Figura 45* se puede apreciar el diagrama de Pareto realizado para estudiar el nivel de significancia de cada variable y su respectiva interacción con los volátiles, en el diagrama se puede apreciar que el límite crítico se encuentra en 2,57, sobre este límite se encuentra la temperatura por lo tanto es una variable significativa, por otro lado el tiempo y la interacción entre ellas se encuentra por debajo del límite, por lo tanto no son significativas, cabe aclarar que el tiempo está al límite de ser una variable significativa, pudiendo tener un bajo impacto sobre el cálculo de volátiles.

Ahora para ver mejor los resultados del Pareto se realizó un modelado que se ajuste a las variables introducidas mediante una regresión factorial o una regresión lineal en búsqueda.

$$\%Volatiles = 95,5 - 0,1507 * Temperatura(^{\circ}C) - 0,158 * Tiempo(min) + 0,00025 * Temperatura(^{\circ}C) * Tiempo(min) \quad (24)$$

Tabla 14 Precisión de ecuación 24

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,916607	96,25%	94,01%	80,90%

Fuente: Fuente Propia

Analizando la *Tabla 14* se puede apreciar la precisión de la ecuación (24), en este caso tiene una precisión alta, que cuenta con márgenes de error menores al 10%, en los coeficientes determinante y ajustado pero que llegan al 19% para el coeficiente predictivo, por tanto, se buscó un modelo que se ajustara mejor, para ello, con ayuda del mismo software se realizó una regresión lineal entre las variables despreciando la interacción entre ellas en búsqueda de un mejor modelo.

$$\%Volatiles = 92,12 - 0,1381 * Temperatura(^{\circ}C) - 0,0905 * Tiempo(min) \quad (25)$$

Tabla 15 Precisión de ecuación 25

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,839016	96,23%	94,98%	91,22%

Fuente: Fuente Propia

En la *Tabla 15* se puede apreciar la precisión para la ecuación (25), en donde se redujo el margen de error de todas las variables a menos del 10% siendo el modelo que se buscaba y resultando innecesario plantear otro modelo más.

5.4 ANÁLISIS DE PODER CALORÍFICO

Tabla 16 Resultado ensayo de poder calorífico

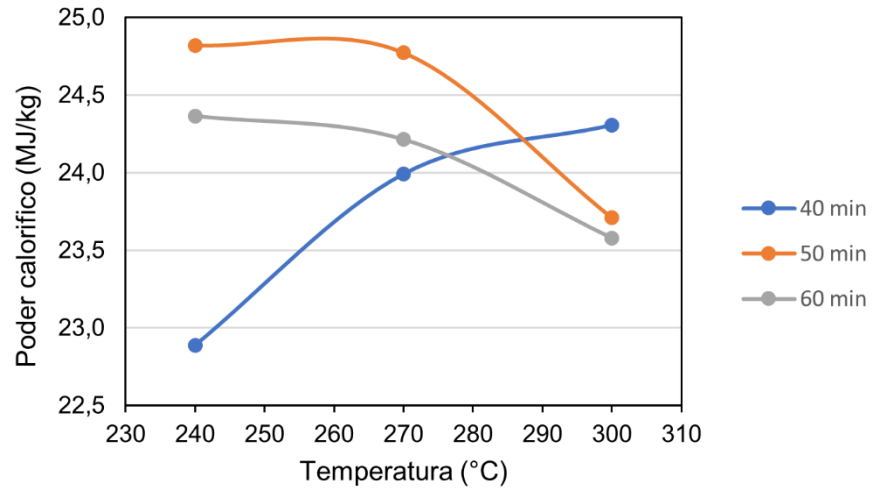
Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	PCS Real (MJ/kg)
0	In natura	In natura	16,2892
1	240	40	22,8855
2	270	40	23,9901
3	300	40	24,3059
4	240	50	24,8188
5	270	50	24,0717
6	300	50	23,7086
7	240	60	24,3637
8	270	60	24,213
9	300	60	23,5787

Fuente: Fuente Propia

Como se puede apreciar en la *Tabla 16*, los resultados obtenidos de la prueba de poder calorífico, para las muestras torrefactadas rondan entre 22,5 y 25 (MJ/Kg), en contraste el ensayo 0 tiene un poder calorífico de 16,29 (MJ/Kg), siendo aproximadamente 1,4 veces más

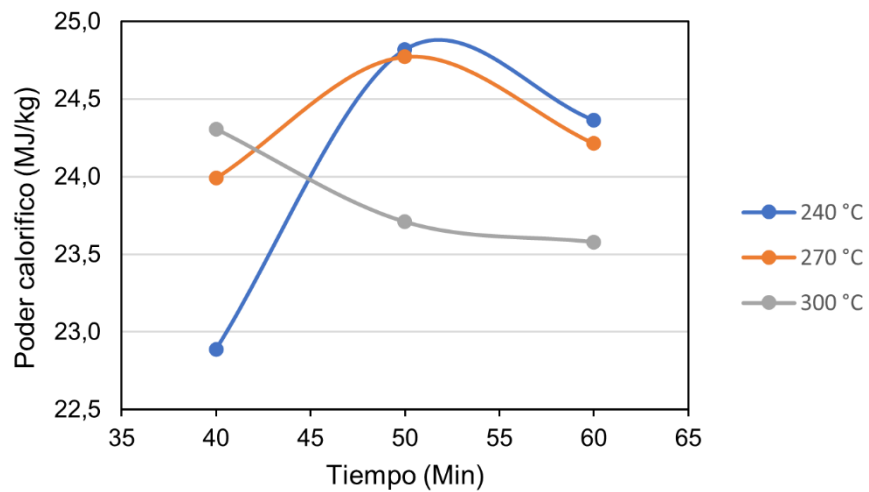
pequeño que el valor mínimo obtenido de las muestras torrefactadas, cabe aclarar que el ensayo arrojó los resultados del poder calorífico superior.

Figura 46 PCS VS Temperatura para todos los tiempos



Fuente: Fuente Propia

Figura 47 PCS VS Tiempo para todas las temperaturas



Fuente: Fuente Propia

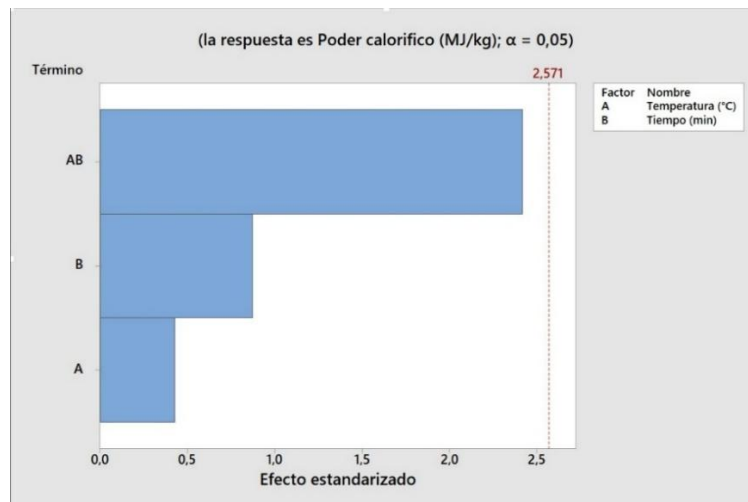
En la *Figura 46* se representa el comportamiento del poder calorífico en función de la temperatura para cada intervalo de tiempo, en este caso el comportamiento de las gráficas es aleatorio con tendencias crecientes y decrecientes dependiendo del intervalo de tiempo, esto lo que demuestra una falta de influencia de la temperatura sobre el poder calorífico superior pues, aunque se aumente se obtendrán resultados diferentes, pero al momento que interactúan ambas variables el efecto si es notorio y por tanto la influencia entre las dos variables puede ser significativa.

En la *Figura 46* se observa el comportamiento del poder calorífico frente al tiempo para cada nivel de temperatura. En este caso y al igual que en la *Figura 47* el comportamiento de las curvas es aleatorio demostrando de igual manera que el tiempo tampoco tiene influencia real sobre el poder calorífico, pero igual que en el caso anterior la influencia entre ambas variables es notoria.

Como se pudo apreciar en las *Figuras 46 y 47* las variables matriciales (temperatura y tiempo) no son significativas puesto que en ambos casos ambas variables no tuvieron una influencia notoria cuando se analizaban individualmente sobre el poder calorífico de las muestras pero que al momento de analizarlas juntas podían tener una influencia significativa, para corroborar esto se realizó un diagrama de Pareto.

En la *Figura 48* se puede apreciar el diagrama de Pareto realizado para estudiar el nivel de significancia de cada variable y su respectiva interacción con el poder calorífico, en el diagrama se puede apreciar que el límite crítico se encuentra en 2,571, en este caso ninguna de las variables pudo superar el punto crítico, por lo tanto ninguna de las variables es significativa, no obstante en este caso la interacción entre ambas variables estuvo cerca del límite, contrario que en todos los casos anteriores, y demostrando de este modo que aunque ninguna de las variables es significativa la interacción entre ellas es la variable que más cerca se encuentra de ser significativa.

Figura 48 Diagrama de Pareto PCS



Fuente: Fuente Propia

Ahora para ver mejor los resultados del Pareto se realizó un modelado que se ajuste a las variables introducidas mediante una regresión factorial o una regresión lineal en búsqueda.

$$PCS = 0,9 - 0,0893 * Temperatura(^{\circ}C) - 0,512 * Tiempo(min) + 0,001838 * Temperatura(^{\circ}C) * Tiempo(min) \quad (26)$$

Cada modelo planteado por Minitab tiene su resumen en donde se plantea la precisión que tiene el modelo presentado.

Tabla 17 Precisión de ecuación 26

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,455929	57,59%	32,15%	0,00%

En la *Tabla 17* se ilustra la precisión con la que cuenta la ecuación (26), en este caso el modelo tiene una precisión muy baja, en donde el error supera el 40% en todos los casos, por el modelo es totalmente impreciso y no puede usarse para modelar el poder calorífico, por lo

tanto y debido a que ninguna variable matricial resulto significativa, se requirió implementar más variables al análisis en búsqueda de un mejor modelo.

Tabla 18 Subconjuntos de variables para asociadas al PCS

Vars	R-cuad.	R-cuad. (ajust)	R-cuad. (pred.)	Cp de Mallows	S	T e m p o (° C)	T u m p o (m i n)	H u m e d a d (%)	V o l á t i l e s (%)	C e n i z a s (%)
1	6,4	0,0	0,0	2,9	0,57232	X				
1	4,8	0,0	0,0	3,1	0,57736			X		
2	29,1	5,4	0,0	3,0	0,53833	X		X		
2	16,0	0,0	0,0	4,1	0,58578	X			X	
3	57,7	32,4	0,0	2,6	0,45525	X		X	X	
3	53,6	25,7	0,0	2,9	0,47700	X		X	X	
4	64,6	29,1	0,0	4,0	0,46596	X	X	X	X	
4	59,3	18,6	0,0	4,5	0,49937	X	X	X	X	
5	64,7	5,8	0,0	6,0	0,53720	X	X	X	X	X

Fuente: Fuente Propia

A la *Tabla 18*, se puede apreciar que ningún subconjunto pudo cumplir con los estándares requeridos y por tanto no se puede determinar un modelo que explique el comportamiento del poder calorífico superior, algo a tener en cuenta es que, aunque no se pudo realizar un modelado, el poder calorífico si depende de la humedad, los volátiles y las cenizas y por tanto de manera indirecta depende del tiempo y la temperatura, especialmente cuando se cruzan, aunque no se pueda determinar.

5.5 ANÁLISIS DE CARBONO FIJO

Para determinar el carbono fijo se recurrió a usar la ecuación 4, de modo que se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 5.

Tabla 19 Resultados obtenidos de carbono fijo

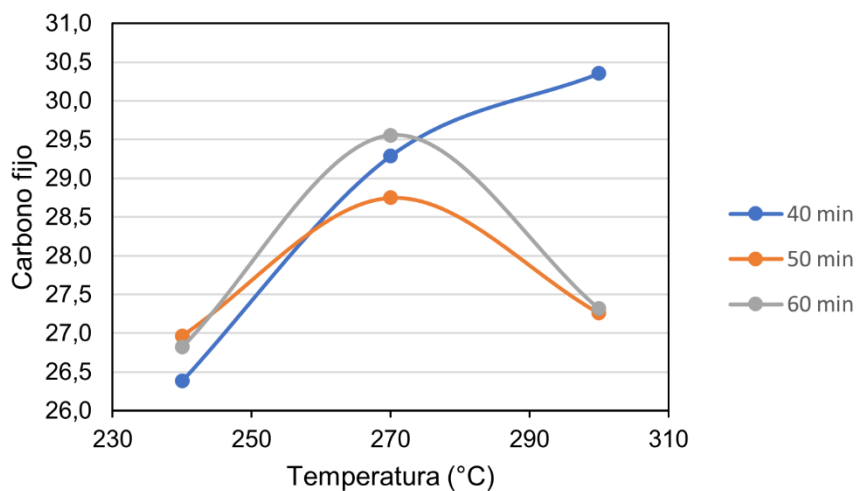
muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	carbono fijo
0	In natura	In natura	12,776
1	240	40	30,347
2	270	40	33,882
3	300	40	35,073
4	240	50	31,056
5	270	50	33,572
6	300	50	32,709
7	240	60	31,126
8	270	60	34,580
9	300	60	32,743

Fuente: Fuente Propia

Como se puede apreciar en la *Tabla 19*, los resultados obtenidos del cálculo del carbono fijo para las muestras torrefactadas rondan entre 30 y 36%, en contraste el ensayo 0 que corresponde a la muestra in natura contiene un 12,776% de carbono fijo, siendo aproximadamente 2,375 veces más pequeño que el valor mínimo de carbono fijo obtenido de las muestras torrefactadas, esto es debido a que la muestra in natura presenta un 24% más de volátiles que las muestras torrefactadas, en comparación con las otras variables como la humedad o las cenizas que su diferencia apenas llegan al 3 y 7% respectivamente, por tanto la variable con mayor impacto sobre la diferencia entre las muestras torrefactadas y la muestra in natura respecto al carbono fijo es los volátiles.

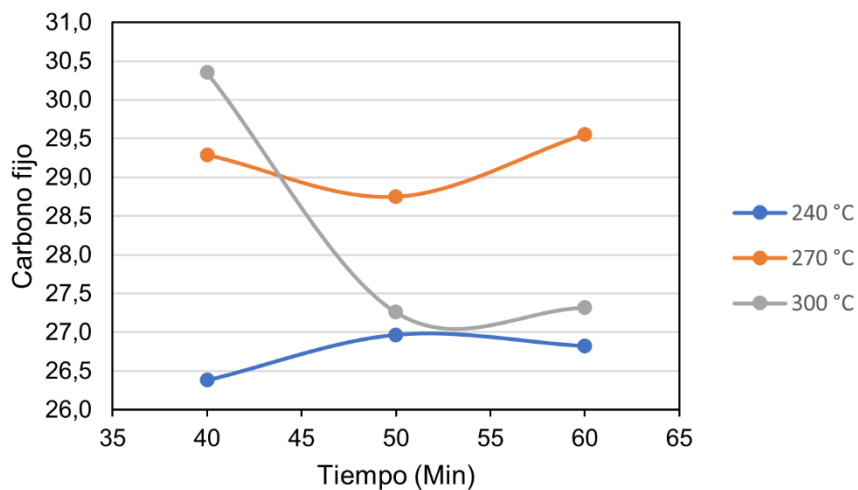
Debido a que el carbono fijo es una variable dependiente de la humedad, las cenizas y los volátiles, y a su vez estas variables son dependientes de la temperatura y del tiempo, resulta importante determinar qué relación tienen estas mismas variables sobre el carbono fijo.

Figura 49 Carbono fijo VS Temperatura para todos los tiempos



Fuente: Fuente Propia

Figura 50 Carbono fijo VS Tiempo para todas las temperaturas



Fuente: Fuente Propia

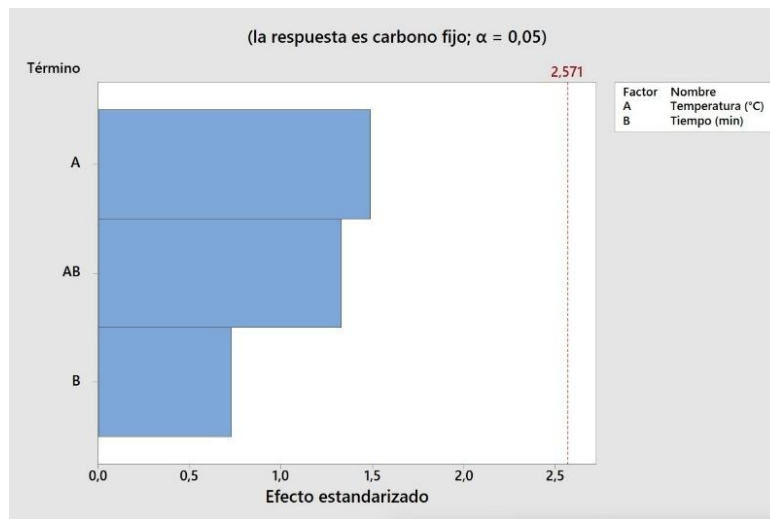
En la *Figura 49* se representa el comportamiento del carbono fijo en función de la temperatura para cada intervalo de tiempo, en este caso el comportamiento es inicialmente creciente en todos los casos pero que posterior a los 270 °C pasa a ser aleatorio con tendencias crecientes y decrecientes dependiendo del intervalo de tiempo, esto demuestra que inicialmente la temperatura tiene una influencia sobre el carbono fijo pero que luego de los 270°C la influencia de la temperatura disminuye considerablemente, mientras que a su vez a partir de este punto la interacción entre la temperatura y el tiempo tiene un efecto notorio.

En la *Figura 50* se observa el comportamiento del carbono fijo frente al tiempo para cada nivel de temperatura. En este caso el comportamiento de las curvas es aleatorio demostrando ya que en algunos puntos es creciente, en otros decreciente y en otros constante, esto demuestra que el tiempo no tiene influencia real sobre el carbono fijo, pero a diferencia del caso anterior en este grafica la influencia que tiene la interacción entre las variables matriciales es menor que la observada en la *Figura 49*.

Como se pudo apreciar en las *Figuras 49* la temperatura es una variable que inicialmente tiene influencia sobre el carbono fijo pero que a partir de un determinado punto pierde su relevancia mientras que en el caso del tiempo no es relevante en ningún punto, finalmente cuando interactúan ambas variables tienen un cierto nivel de relevancia, para corroborar esto y ver de mejor manera el impacto de cada variable sobre el carbono fijo se realizó un diagrama de Pareto.

En la *Figura 51* se puede apreciar el diagrama de Pareto realizado para estudiar el nivel de significancia de cada variable y su respectiva interacción con el carbono fijo, en el diagrama se puede apreciar que el límite crítico se encuentra en 2,571, en este caso ninguna de las variables pudo superar el punto crítico, por lo tanto, ninguna de las variables es significativa.

Figura 51 Diagrama de Pareto carbono fijo



Fuente: Fuente Propia

Para este caso no es necesario buscar un modelo que se ajuste al comportamiento del carbono fijo, pues ya se cuenta con la ecuación (4).

Es importante recalcar que, aunque el tiempo y la temperatura no tuvieron un impacto directo sobre el carbono fijo, estas dos variables si llegan a afectar este parámetro de manera indirecta puesto que estas mismas afectan variables como las cenizas y los volátiles, los cuales afectan directamente al cálculo del carbono fijo.

5.6 ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO DEL PROCESO DE TORREFACCIÓN.

Siguiendo la metodología planteada, se tomaron los datos del consumo de cada ensayo realizado, uno para cada combinación de tiempo y temperatura de torrefacción.

Figura 52 Montaje Wattímetro digital



Fuente: Fuente Propia

Tabla 20 Consumo energético del reactor por cada ensayo (25g de materia in natura)

Temperatura objetivo (°C)	Tiempo de calentamiento (min)	Consumo calentamiento (KW)	Tiempo de residencia (min)	Consumo residencia (KW)	ET (KW)
240	19	0,298	40	0,128	0,426
270	21	0,335	40	0,153	0,488
300	24	0,379	40	0,178	0,557
240	19	0,298	50	0,163	0,461
270	21	0,335	50	0,193	0,528
300	24	0,379	50	0,223	0,602
240	19	0,298	60	0,193	0,491
270	21	0,335	60	0,231	0,566
300	24	0,379	60	0,267	0,646

Fuente: Fuente Propia

En la *tabla 20* se observa la energía consumida durante la torrefacción haciendo uso de la ecuación (11), donde podemos evidenciar que el mayor consumo se da durante la etapa de calentamiento.

Para determinar el consumo por kilogramo de biomasa in natura durante el proceso de torrefacción mediante la ecuación (12) como se muestra a continuación en la *tabla 21*

Tabla 21 Consumo de energía por kilogramo de biomasa in natura durante la torrefacción

Temperatura objetivo (°C)	Tiempo de calentamiento (min)	Consumo calentamiento (KW)	Tiempo de residencia (min)	Consumo residencia (KW)	ET_kg (MJ)
240	19	0,298	40	0,128	61,344
270	21	0,335	40	0,153	70,272
300	24	0,379	40	0,178	80,234
240	19	0,298	50	0,163	66,384
270	21	0,335	50	0,193	76,011
300	24	0,379	50	0,223	86,649
240	19	0,298	60	0,193	70,704
270	21	0,335	60	0,231	81,566
300	24	0,379	60	0,267	93,063

Fuente: Fuente Propia

Cabe resaltar que elevado consumo energético se debe a que el reactor utilizado para realizar la torrefacción está diseñado para uso académico, siendo este incapaz de manejar grandes cantidades de muestra.

5.7 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO ENERGÉTICO

El análisis de la energía resultante del proceso de torrefacción de la biomasa in natura es fundamental para identificar cuál de los ensayos realizados presenta el mayor rendimiento energético.

Considerando la energía consumida durante la torrefacción por kilogramo de biomasa in natura calculada mediante la ecuación (12), se procede a calcular el rendimiento energético mediante la ecuación (14), utilizando para ello los valores experimentales del poder calorífico obtenidos a partir de los ensayos con la bomba calorimétrica y el rendimiento masico del proceso, obtenido de la ecuación (13).

Tabla 22 Rendimiento energético

Muestra	PCS (MJ/kg)	Rendimiento masico (kg/kg)	ET_kg (MJ)	RE (MJ)
1	22,886	0,630	61,344	-46,917
2	23,990	0,530	70,272	-57,557
3	24,306	0,495	80,234	-68,194
4	24,819	0,584	66,384	-51,882
5	25,072	0,505	76,011	-63,351
6	23,709	0,418	86,649	-76,740
7	24,364	0,574	70,704	-56,719
8	23,113	0,501	81,566	-69,976
9	23,579	0,406	93,063	-83,496

Fuente: Fuente Propia

Como se muestra en la *tabla 22*, la energía requerida (RE), supera ampliamente a la energía resultante del proceso de torrefacción por kilogramo de biomasa in natura (ET_kg), lo que significa que se utilizó más energía de la obtenida en el proceso de torrefacción.

5.7 ANÁLISIS DE LOS MODELOS PREDICTIVOS

Mediante los modelos seleccionados del análisis de Minitab; cenizas (Ecuación 11), volátiles (Ecuación 15), poder calorífico (Ecuación 5) y rendimiento energético (Ecuación 5), se realizaron proyecciones en los rangos de 200 a 320°C y 20 a 60 minutos, con los datos obtenidos, se realizó el análisis de poder calorífico en base a un kilogramo de muestra in natura, como se muestra en la ecuación (15), para finalmente, tomando esta propiedad como criterio de evaluación, se identificó el máximo valor local de poder calorífico.

Tabla 23 Calculo teórico del poder calorífico superior

Temperatura (°C)	Tiempo (min)								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
200	19,90	20,06	20,22	20,38	20,56	20,74	20,93	21,13	21,34
210	20,13	20,26	20,40	20,54	20,69	20,85	21,00	21,17	21,34
220	19,89	19,98	20,08	20,19	20,29	20,40	20,51	20,63	20,75
230	21,49	21,63	21,77	21,91	22,06	22,21	22,36	22,52	22,68
240	20,88	20,94	20,99	21,05	21,11	21,17	21,22	21,28	21,34
250	21,17	21,19	21,21	21,23	21,25	21,28	21,30	21,32	21,34
260	21,47	21,45	21,44	21,42	21,41	21,39	21,37	21,36	21,34
270	21,78	21,73	21,67	21,62	21,56	21,51	21,45	21,40	21,34
280	22,12	22,01	21,91	21,82	21,72	21,62	21,53	21,44	21,34
290	22,46	22,31	22,17	22,02	21,88	21,74	21,61	21,48	21,35
300	22,83	22,62	22,43	22,24	22,05	21,87	21,69	21,51	21,35
310	23,21	22,95	22,70	22,45	22,22	21,99	21,77	21,55	21,35
320	23,60	23,28	22,98	22,68	22,39	22,12	21,85	21,59	21,35

Alto	Medio	Bajo

Fuente: Fuente Propia

Tabla 24 Comparación PCS teórico VS experimental

Muestra	PCS Experimental (MJ/kg)	PCS Teórico (MJ/kg)	%E
1	22,886	21,108	8%
2	23,990	21,223	12%
3	24,306	21,341	12%
4	24,819	21,560	13%
5	25,072	21,451	14%
6	23,709	21,344	10%
7	24,364	22,048	10%
8	23,113	21,688	6%
9	23,579	21,346	9%

Fuente: Fuente Propia

Al analizar los resultados presentados en la *tabla 23*, se evidencia que los valores del poder calorífico teóricos presentan una tendencia de crecimiento a mayores valores de temperatura y menores tiempos, pudiéndose identificar el máximo local a la torrefacción en condiciones de 320°C y 20 minutos.

Mediante la comparación del poder calorífico superior calculado de manera teórica y el experimental presentada en la *tabla 24*, se evidencia un error de hasta el 14%, que, considerando el error acumulado por los modelos de volátiles, ceniza y humedad, estos datos se pueden tomar como referencia para la determinación de un máximo local en cuanto a poder calorífico superior se trata.

5.8 ANÁLISIS PELLET

El análisis de integridad del pellet se llevó a cabo mediante el ensayo de caída libre (Drop Test) y mediante la fórmula de integridad (7), mediante la realización de este ensayo a las cuatro muestras con mayor eficiencia energética, el ensayo 1, 4, 5 y 7, como se muestra en la *Tabla 22* a continuación.

Tabla 25 Resultados ensayo integridad del pellet

Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Integridad promedio	Desviación
1	240	40	96%	0,0122
4	240	50	97%	0,0054
5	270	50	96%	0,0132
7	240	60	96%	0,0115

Fuente: Fuente Propia

En la gráfica anterior se puede observar que la integridad de los pellets de las muestras seleccionadas oscila entre un 96 y 97% aproximadamente, si bien la norma ASTM 440-07 no plantea un método de evaluación, se podría realizar una evaluación basándose en la norma ISO 17225-2:2021, la cual indica una integridad mínima de 96,5% para pellets industriales,

pero debido a la diferencia de las condiciones del ensayo, estos resultados no son concluyentes.

6. CONCLUSIONES

La ejecución del proyecto permitió evaluar la capacidad de la cereza de café como base para la producción de un combustible sólido compacto, demostrando su potencial de aprovechamiento como subproducto de la cadena cafetera. Tras realizar la torrefacción, el análisis próximo y la evaluación del poder calorífico superior (PCS), se determinó que la condición con mayor potencial correspondió a la torrefacción a 240 °C durante 50 minutos, alcanzando un PCS de 24,82 MJ/kg, aproximadamente 1,5 veces superior al de la biomasa *in natura*.

En el proceso de peletización no fue necesario emplear aditivos aglomerantes, ya que el material resultante de la torrefacción liberó un fluido viscoso que actuó como agente de cohesión natural. Asimismo, se evidenció que, bajo una presión de 145 PSI, fue posible obtener pellets compactos y resistentes, con un coeficiente de integridad cercano al 96 %, evaluado mediante ensayos de caída libre.

En cuanto al análisis energético, se evidenció que el proceso de torrefacción no resulta favorable desde el punto de vista del rendimiento energético, ya que el consumo de energía durante el proceso supera la energía obtenida posteriormente. Esta situación se atribuye principalmente al tipo de equipo utilizado. Por ello, se recomienda realizar el proceso en reactores diseñados específicamente para producción, con el objetivo de optimizar la torrefacción y minimizar el consumo energético.

En términos generales, el estudio confirmó que es posible obtener un combustible sólido compacto con propiedades térmicas superiores a las de la biomasa *in natura*, mediante la aplicación de torrefacción y peletización a partir de la cereza de café como materia prima.

REFERENCIAS

- Alemayehu, Y. A., Asfaw, S. L., & Terfie, T. A. (2022). Hydrolyzed urine for enhanced valorization and toxicant degradation of wet coffee processing wastes: Implications for soil contamination and health risk reductions. *Journal of Environmental Management*, 307, 114536. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114536>
- Buencafé, C., & Almacafé, P. (n.d.). EDITORIAL ESTRATEGIA ECONÓMICO Balance mundial cafetero Producción nacional Valor de la cosecha.
- Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F. I., de Lira-Flores, J. A., & Hernández, S. (2017). A review on the production processes of renewable jet fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 709–729. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.108>
- Isikgor, F. H., & Becer, C. R. (2015). Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polymer Chemistry*, 6(25), 4497–4559. <https://doi.org/10.1039/C5PY00263J>
- Ismael, M., Shang, Q., Yue, J., & Wark, M. (2024). Photooxidation of biomass for sustainable chemicals and hydrogen production on graphitic carbon nitride-based materials: A comprehensive review. *Materials Today Sustainability*, 27, 100827. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100827>
- Lebepe, P., & Mathaba, T. N. D. (2024). Impact assessment of electricity shortage on enterprises: A systematic literature review. *Energy for Sustainable Development*, 81, 101468. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101468>
- Mendoza Martinez, C. L., Saari, J., Melo, Y., Cardoso, M., de Almeida, G. M., & Vakkilainen, E. (2021). Evaluation of thermochemical routes for the valorization of solid

coffee residues to produce biofuels: A Brazilian case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110585. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110585>

Suelo, A. Y., A, B. W., Juan José Castro Mora, I., & Alirio Botello Suárez Profesor asociado, W.

(n.d.). Protocolo para la obtención de un biocomposito a partir de residuos de café REVISTA AMBIENTAL PROTOCOL FOR OBTAINING A BIOCOMPOSITE FROM COFFEE WASTE GENERATED IN VENECIA (CUNDINAMARCA) PROTOCOLO PARA LA OBTENCIÓN DE UN BIOCOMPOSITO A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ GENERADOS EN VENECIA (CUNDINAMARCA).

UNAM. (n.d.). Comité de Biocombustibles. v18n40a06. (n.d.). Vega, L. P., Bautista, K. T., Campos, H., Daza, S., & Vargas, G. (2024). Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia.

Energy Reports, 11, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.060>

Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101757.

<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>

Caillat, S., & Vakkilainen, E. (2013). Large-scale biomass combustion plants: an overview. *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, 189–224. <https://doi.org/10.1533/9780857097439.3.189>

Aniza, R., Chen, W.-H., Kwon, E. E., Bach, Q.-V., & Hoang, A. T. (2024). Lignocellulosic biofuel properties and reactivity analyzed via thermogravimetric analysis: A review. *Cleaner Energy Systems*, 6, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100142>

Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J. D., Sofan-German, S., Mendoza, J. M., & Bula-Silvera, A. (2024). Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key

characteristics. *Results in Chemistry*, 12, 101886.
<https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101886>

Vaillant. (s.f.). Poder calorífico. Glosario Vaillant. Recuperado de
<https://www.vaillant.es/servicios/temas-de-ayuda/glosario/poder-calorifico/>

Cientisol. (2024). Medición de humedad en biomasa. *Cientisol*. Recuperado de
<https://cientisol.com/medicion-de-humedad-en-biomasa/>

ANEXOS

Anexos A Proceso de secado de la cereza de café al sol

Toma de datos	Humedad Perdida (%)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	72,000	72,868	72,445	72,438
2	72,559	73,902	72,984	73,148
3	73,032	75,194	73,351	73,859
4	73,849	75,452	74,407	74,570
5	74,581	75,969	75,291	75,280
6	75,108	75,979	75,368	75,485
7	75,103	75,914	75,390	75,469

Anexos B Calibración del reactor de pirólisis

Temperatura Objetivo °C	Temperatura Corregida °C
200	261,58
210	272,89
220	284,21
230	295,52
240	306,84
250	318,16
260	329,47
270	340,79
280	352,10
290	363,42

Anexos C Ensayo de humedad

Muestra	Replica	% Humedad 1ra toma	% Humedad 2da toma	Desviación Entre Tomas	Desviación	Promedio
0	1	12,36%	12,11%	0,0026	0,25	12,17%
	2	12,17%	11,72%	0,0047		
	3	12,45%	12,19%	0,0028		
1	1	8,88%	8,61%	0,0029	0,34	8,61%
	2	8,83%	8,56%	0,0029		
	3	8,79%	8,00%	0,0084		
2	1	9,04%	8,72%	0,0028	0,29	8,76%
	2	9,08%	8,17%	0,0082		
	3	8,92%	8,61%	0,0029		
3	1	9,17%	8,25%	0,0082	0,42	8,71%
	2	9,12%	8,80%	0,0029		
	3	8,94%	7,97%	0,0086		
4	1	8,42%	8,15%	0,0029	0,25	8,52%
	2	8,98%	8,16%	0,0087		
	3	8,83%	8,59%	0,0027		
5	1	9,69%	8,73%	0,0086	0,25	9,18%
	2	9,41%	9,10%	0,0028		
	3	9,55%	8,62%	0,0083		
6	1	9,83%	9,11%	0,0064	0,21	9,56%
	2	9,73%	9,50%	0,0021		
	3	9,76%	9,43%	0,0030		
7	1	9,22%	8,44%	0,0084	0,28	8,96%
	2	9,23%	8,97%	0,0028		
	3	9,34%	8,57%	0,0081		
8	1	9,51%	9,20%	0,0027	0,34	9,24%
	2	9,49%	8,60%	0,0080		
	3	9,48%	9,18%	0,0026		
9	1	9,83%	8,92%	0,0082	0,35	9,51%
	2	9,86%	9,57%	0,0026		
	3	9,88%	9,03%	0,0078		

Anexos D Ensayo de cenizas

Muestra	%Cenizas	Desviación	Promedio
0	10,93%	0,0647	10,96%
	10,92%		
	11,04%		
1	18,12%	0,7252	17,37%
	16,67%		
	17,34%		
2	20,76%	0,0771	20,67%
	20,62%		
	20,63%		
3	22,07%	0,1809	22,12%
	22,32%		
	21,98%		
4	18,74%	0,1996	18,75%
	18,95%		
	18,55%		
5	21,70%	0,1529	21,68%
	21,51%		
	21,82%		
6	26,47%	0,2130	26,22%
	26,07%		
	26,12%		
7	19,36%	0,8278	19,52%
	18,77%		
	20,41%		
8	22,87%	0,9307	21,87%
	21,72%		
	21,02%		
9	27,30%	0,2771	26,99%
	26,87%		
	26,79%		

Anexos E Ensayo de material volátil

Muestra	Contenido material Volátil	Desviación	Material Volátil Promedio
0	78,84%	0,2322	79,10%
	79,20%		
	79,27%		
1	57,45%	1,2093	56,26%
	55,03%		
	56,28%		
2	49,06%	0,8906	50,06%
	50,34%		
	50,78%		
3	47,05%	0,5365	47,55%
	48,12%		
	47,49%		
4	54,66%	0,8078	54,31%
	54,87%		
	53,38%		
5	49,62%	0,7168	49,57%
	50,27%		
	48,83%		
6	46,16%	0,4504	46,56%
	46,46%		
	47,05%		
7	54,91%	0,7284	54,11%
	53,94%		
	53,49%		
8	49,30%	0,6200	48,62%
	48,47%		
	48,08%		
9	45,51%	0,3465	45,71%
	45,51%		
	46,11%		

Anexos F Ensayo caída libre (Drop Test)

Muestra	Replica	Peso inicial	Drop test	Pérdida de masa	Integridad	Promedio	Desviación
1	1	1,3855	1,3248	0,0607	96%	96%	0,0122
	2	1,4030	1,3598	0,0432	97%		
	3	1,3659	1,3263	0,0396	97%		
	4	1,4485	1,3866	0,0619	96%		
	5	1,3876	1,3207	0,0669	95%		
4	1	1,4187	1,3678	0,0509	96%	97%	0,0054
	2	1,4004	1,3462	0,0542	96%		
	3	1,3738	1,3263	0,0475	97%		
	4	1,4473	1,4071	0,0402	97%		
	5	1,4344	1,3825	0,0519	96%		
5	1	1,4428	1,3748	0,0680	95%	96%	0,0132
	2	1,3997	1,3510	0,0487	97%		
	3	1,4402	1,3640	0,0762	95%		
	4	1,4257	1,3779	0,0478	97%		
	5	1,4380	1,3668	0,0712	95%		
7	1	1,3853	1,3454	0,0399	97%	96%	0,0115
	2	1,3639	1,3204	0,0435	97%		
	3	1,4261	1,3626	0,0635	96%		
	4	1,4067	1,3413	0,0654	95%		
	5	1,4317	1,3812	0,0505	96%		

Anexos G Proyección mediante modelo de % humedad

Temperatura (°C)	Tiempo (min)								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
200	7,53	7,67	7,80	7,94	8,08	8,22	8,35	8,49	8,63
210	7,62	7,76	7,90	8,03	8,17	8,31	8,45	8,58	8,72
220	7,72	7,85	7,99	8,13	8,27	8,40	8,54	8,68	8,81
230	7,81	7,95	8,08	8,22	8,36	8,50	8,63	8,77	8,91
240	7,90	8,04	8,18	8,32	8,45	8,59	8,73	8,86	9,00
250	8,00	8,13	8,27	8,41	8,55	8,68	8,82	8,96	9,09
260	8,09	8,23	8,37	8,50	8,64	8,78	8,91	9,05	9,19
270	8,18	8,32	8,46	8,60	8,73	8,87	9,01	9,14	9,28
280	8,28	8,42	8,55	8,69	8,83	8,96	9,10	9,24	9,37
290	8,37	8,51	8,65	8,78	8,92	9,06	9,19	9,33	9,47
300	8,47	8,60	8,74	8,88	9,01	9,15	9,29	9,42	9,56
310	8,56	8,70	8,83	8,97	9,11	9,24	9,38	9,52	9,66
320	8,65	8,79	8,93	9,06	9,20	9,34	9,47	9,61	9,75

Anexos H Proyección modelo de % cenizas

Temperatura (°C)	Tiempo (min)								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
200	15,44	15,16	14,87	14,59	14,30	14,02	13,73	13,45	13,16
210	15,76	15,61	15,46	15,30	15,15	15,00	14,84	14,69	14,54
220	16,08	16,06	16,04	16,02	16,00	15,98	15,96	15,94	15,92
230	16,41	16,52	16,63	16,74	16,85	16,96	17,07	17,18	17,29
240	16,73	16,97	17,21	17,46	17,70	17,94	18,19	18,43	18,67
250	17,05	17,43	17,80	18,18	18,55	18,93	19,30	19,68	20,05
260	17,37	17,88	18,39	18,89	19,40	19,91	20,41	20,92	21,43
270	17,69	18,33	18,97	19,61	20,25	20,89	21,53	22,17	22,81
280	18,02	18,79	19,56	20,33	21,10	21,87	22,64	23,41	24,18
290	18,34	19,24	20,14	21,05	21,95	22,85	23,76	24,66	25,56
300	18,66	19,70	20,73	21,77	22,80	23,84	24,87	25,91	26,94
310	18,98	20,15	21,32	22,48	23,65	24,82	25,98	27,15	28,32
320	19,30	20,60	21,90	23,20	24,50	25,80	27,10	28,40	29,70

Anexos I Proyección modelo de % volátiles

Temperatura (°C)	Tiempo (min)								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
200	62,69	62,24	61,79	61,33	60,88	60,43	59,98	59,52	59,07
210	61,31	60,86	60,40	59,95	59,50	59,05	58,59	58,14	57,69
220	62,13	61,68	61,22	60,77	60,32	59,87	59,41	58,96	58,51
230	55,28	54,71	54,13	53,56	52,98	52,40	51,83	51,25	50,68
240	57,17	56,71	56,26	55,81	55,36	54,90	54,45	54,00	53,55
250	55,79	55,33	54,88	54,43	53,98	53,52	53,07	52,62	52,17
260	54,40	53,95	53,50	53,05	52,59	52,14	51,69	51,24	50,78
270	53,02	52,57	52,12	51,67	51,21	50,76	50,31	49,86	49,40
280	51,64	51,19	50,74	50,28	49,83	49,38	48,93	48,47	48,02
290	50,26	49,81	49,36	48,90	48,45	48,00	47,55	47,09	46,64
300	48,88	48,43	47,98	47,52	47,07	46,62	46,17	45,71	45,26
310	47,50	47,05	46,59	46,14	45,69	45,24	44,78	44,33	43,88
320	46,12	45,67	45,21	44,76	44,31	43,86	43,40	42,95	42,50

Anexos J Proyección rendimiento masico del proceso de torrefacción

Temperatura (°C)	Tiempo (min)								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
200	0,71	0,72	0,74	0,75	0,77	0,78	0,80	0,81	0,83
210	0,69	0,70	0,71	0,72	0,72	0,73	0,74	0,75	0,75
220	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,69	0,69	0,69	0,69
230	0,67	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,63
240	0,65	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,59	0,59
250	0,64	0,63	0,62	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55
260	0,63	0,61	0,60	0,58	0,56	0,55	0,54	0,52	0,51
270	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,51	0,49	0,48
280	0,61	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,47	0,45
290	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,43
300	0,59	0,56	0,53	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42	0,41
310	0,58	0,54	0,51	0,49	0,46	0,44	0,42	0,40	0,39
320	0,57	0,53	0,50	0,47	0,45	0,42	0,40	0,39	0,37

