



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Química
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EVALUACIÓN DE PELLETS ELABORADOS CON MEZCLAS DE BIOMASA TORREFACTADA, ASERRÍN DE PINO Y PODA DE ARÁNDANO PARA SATISFACER TAREAS DE COCCIÓN: GASES DE EFECTO INVERNADERO Y DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Tesis que para obtener el grado de:
Maestra en Ciencias en Ingeniería Química

Presenta

ING. MARÍA DE LOS ÁNGELES ÁLVAREZ AYALA

Director de tesis: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco

Co-director de tesis: Dr. Víctor Manuel Ruíz García

Morelia, Michoacán

Abril del 2023



RESUMEN

EVALUACIÓN DE PELLETS ELABORADOS CON MEZCLAS DE BIOMASA TORREFACTADA, ASERRÍN DE PINO Y PODA DE ARÁNDANO PARA SATISFACER TAREAS DE COCCIÓN: GASES DE EFECTO INVERNADERO Y DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Por

I.Q. María de los Ángeles Álvarez Ayala

Abril del 2023

Dirigida por: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y
Dr. Víctor Manuel Ruíz García

La peletización y la torrefacción son técnicas que mejoran las características de la biomasa para su posterior uso como biocombustible; almacenamiento, manejo, densidad energética, entre otras. La combinación de estas técnicas aplicadas a la biomasa residual agroforestal permiten aprovecharla como bioenergéticos de mayor calidad.

El presente trabajo utiliza dos tipos de residuos base: aserrín de pino (Aserrín) y poda de arándano (Poda), biomasa que fue sometida a torrefacción. Se obtuvieron 4 tipos de pellets: pellet de Aserrín (A), pellet Poda (P), pellet de Aserrín+Aserrín torrefactado (AT) y pellet de Poda+Poda torrefactada (PT). Las mezclas para los últimos dos pellets son en 50%-50% en peso.

Los pellets obtenidos fueron posteriormente caracterizados y evaluados en términos de desempeño energético y emisiones, mediante gasificadores capaces de realizar la tarea de nixtamalizado del maíz en ciclos controlados de cocción (CCT, por sus siglas en inglés) y pruebas de ebullición de agua (WBT, por sus siglas en inglés), esperando resultados favorables para los pellets sometidos previamente a la torrefacción. Los resultados fueron analizados en la herramienta estadística MINITAB.

De acuerdo con su caracterización, solo los pellets A, P y AT son considerados pellets de calidad, excluyendo de esta categoría al pellet PT por superar el contenido de cenizas recomendado. Se observa que la peletización y la torrefacción afectan a la mayoría de las variables de respuesta, con una confiabilidad del 95% para ambas pruebas, WBT y CCT. En las pruebas WBT, el pellet recomendado de acuerdo con el desempeño energético y emisiones es el pellet tipo AT, mismo caso para las emisiones de la prueba CCT, mientras que el desempeño energético en esta última prueba es favorable para los pellets tipo A.

Palabras clave: Residuos agroforestales, torrefacción, peletización, gasificador, emisiones.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF PELLETS MADE OF MIXTURES FROM TORREFIED BIOMASS, PINE SAWDUST AND BLUEBERRY PRUNING TO SATISFY COOKING TASKS: GREENHOUSE GASES AND ENERGY PERFORMANCE

By

ChE María de los Ángeles Álvarez Ayala

April, 2023

Supervised by: PhD Marco Antonio Martínez Cinco and

PhD Víctor Manuel Ruíz García

Pelletization and torrefaction are techniques that improve biomass characteristics for its subsequent use as biofuel, such as storage, handling, energy density, among others. The combination of these techniques applied to residual agroforestry biomass allows it to be used as a higher quality bioenergy

The present work uses two types of base residues: pine sawdust (Sawdust) and blueberry pruning (Pruning), exposed to torrefaction. Four types of pellets were obtained: Sawdust pellet (A), Pruning pellet (P), Sawdust+Torrefied Sawdust pellet (AT) and Pruning+Torrefied Pruning pellet (PT). The mixtures for the last two pellets are 50%-50% by weight.

The pellets obtained were characterized and evaluated in terms of their energy performance and emissions, using them in gasifiers, which are devices adapted to their use, through in controlled cooking tests (CCT) and water boiling tests (WBT), expecting favorable results for the pellets previously subjected to roasting. The results were analyzed using the MINITAB statistical tool.

Corresponding to their characterization, only pellets A, P and AT are considered quality pellets, excluding PT pellet for exceed recommended ash content. Pelletization and torrefaction affect most response variables, with 95% reliability for both WBT and CCT tests. In WBT tests, the recommended pellet according to energy performance and emissions is the pellet type AT, same case for CCT test emissions, while the energy performance in the last test is favorable for pellets type A.

Keywords: Agroforestry residues, torrefaction, pelletization, gasifier, emissions.

Dedicatoria

A papá Chucho y Fermín.

No pude contarles como terminó esta aventura de mi vida académica que inicié con ustedes a mi lado.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	iii
Dedicatoria.....	v
Índice de figuras	ix
Índice de Tablas	x
Nomenclatura	xii
Agradecimientos	xiv
Capítulo 1	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación.....	4
1.3. Planteamiento del problema.....	5
1.4 Hipótesis	5
1.5 Objetivos	6
Capítulo 2.....	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 Biomasa y bioenergía.....	7
2.2 Procesos de conversión de la biomasa.....	8
2.3 Pellets	10
2.4 Conversión termoquímica	13
2.5 Diseño de experimentos factorial	18
2.6 Comparaciones múltiples	21
Capítulo 3.....	23

METODOLOGÍA	23
3.1 Caracterización de pellets	24
3.2 Torrefacción de la biomasa	26
3.3 Producción de pellets	28
3.4 Desempeño energético y emisiones de los pellets	29
3.5 Análisis estadístico de las diferencias del desempeño energético y emisiones entre biocombustibles	33
Capítulo 4	35
RESULTADOS	35
4.1 Caracterización de los pellets piloto	35
4.2 Torrefacción de la biomasa y peletización	36
4.3 Caracterización de pellets tipo A, AT, P y PT.....	39
4.4 Desempeño energético y emisiones de los pellets	41
4.5 Análisis estadístico de las diferencias del desempeño energético y emisiones entre biocombustibles	47
Capítulo 5	56
CONCLUSIONES	56
Capítulo 6	58
RECOMENDACIONES A FUTURO	58
Capítulo 7	59
BIBLIOGRAFIA.....	59
APÉNDICE A	65
Análisis granulométrico	65
Análisis elemental	67
APÉNDICE B	68
Pruebas WBT	68

APÉNDICE C.....	97
Emisiones de CO y CO ₂ en el uso de los pellets.....	97
Emisiones de CO y CO ₂ en el uso de los pellets.....	101

Índice de figuras

Figura 2.1 Componentes de un gasificador. (Roth et al 2014)	17
Figura 3.1 Gasificador EMII-02 (Izquierda), Diagrama del gasificador (Derecha)	27
Figura 3.2 Canasta del horno de pirólisis	27
Figura 3.3 Peletizadora MEELKO y su matriz (Izquierda y derecha, respectivamente) ..	28
Figura 3.4 Equipo GM640 para medición de humedad en granos	29
Figura 3.5 Campana para captura de emisiones del LINEB	30
Figura 3.6 Patsari Nixtamalera (Izquierda) Gasificador P3 Chupiri (Derecha)	31
Figura 3.7 Sistema Portátil de Medición de Emisiones PEMS	32
Figura 3.8 Bomba de succión (derecha) y ciclón (izquierda).....	32
Figura 3.9 Cromatógrafo de gases Young Li.....	33
Figura 4.1 Torrefacción de materias prima.....	36
Figura 4.2 Aserrín de pino húmedo (derecha) y pellets de aserrín de pino (Izquierda)..	37
Figura 4.3 Producto del primer intento de peletización de pellets AT (Derecha). Producto final, pellets AT (izquierda).....	38
Figura 4.4 Pellets de poda de Arándano (Izquierda). Pellets PT (Derecha).....	39
Figura 4.5 Caracterización: Análisis de proximales en porcentajes.	40
Figura 4.6 Caracterización de pellets: Poder calorífico superior. La línea intermitente roja marca el umbral de PCS para los pellets de calidad	41
Figura 4.7 Microgasificador Biolite	41
Figura 4.8 Esta secuencia de 3 figuras muestra el pesado de pellets con el dispositivo P3 chupiri, su posterior encendido y finalmente su uso en la patsari adaptada a la nixtamalera.	44
Figura A.7.1 Agitador de tamices RO-TAP	65
Figura A.7.2 Distribución de tamaños de partícula para Aserrín de pino (izquierda) y Poda de Arándano (derecha)	66
Figura A.7.3 Comparación de tamaños de partícula de Poda de Arándano (izquierda) y Aserrín de pino (Izquierda).....	67

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Procesos de conversión de la biomasa (Salinas y Gasca, 2009)	9
Tabla 2.2 Tipos de Biocombustibles (Salinas y Gasca, 2009)	9
Tabla 2.3 Parámetros recomendados de la calidad de los pellets e importancia. (Priyabrata, et al 2017; ISO 17225-2, Manual EnPlus).....	11
Tabla 2.4 Comparación entre los cuatro principales procesos termoquímicos de conversión de la biomasa (Basú, 2010)	13
Tabla 2.5 Cambios en las propiedades del bagazo después de someterse a torrefacción a 250°C	15
Tabla 2.6 Experimento de dos factores con n réplicas	18
Tabla 2.7 Fórmulas para el análisis de varianza para el diseño factorial de dos factores.	20
Tabla 3.1 Mezclas propuestas para la producción de pellets de aserrín de pino y biomasa torrefactada	23
Tabla 3.2 Mezclas propuestas para la producción de pellets de rastrojo de frutillas y torrefactada.	23
Tabla 4.1 Caracterización de pellets piloto.....	35
Tabla 4.2 Tipos de pellets y su composición	37
Tabla 4.3 Caracterización de pellets producidos.....	40
Tabla 4.4 Variables de respuesta del desempeño energético para las pruebas WBT ...	42
Tabla 4.5 Factores de emisión g/kg de combustible seco consumido.....	43
Tabla 4.6 Tasa de emisión (g/min)	43
Tabla 4.7 Factores de emisión por energía útil (g/MJ)	43
Tabla 4.8 Factores de emisión por energía liberada por el combustible (g/MJ)	44
Tabla 4.9 Parámetros del desempeño energético para las pruebas CCT	45
Tabla 4.10 Factores de emisión g/kg de combustible seco consumido.....	45
Tabla 4.11 Tasa de emisión (g/min)	46
Tabla 4.12 Factores de emisión por masa de alimento preparado (g/Kg)	46
Tabla 4.13 Tasas de emisión fugitivas o intradomiciliarias.....	46

Tabla 4.14 Diseño factorial para análisis del efecto del material y procesamiento de pellets en el desempeño energético y emisiones.	48
Tabla 4.15 P- valores para las variables de respuesta del desempeño energético de las pruebas WBT.	49
Tabla 4.16 P- valores para las variables de respuesta del desempeño energético de las pruebas CCT.....	50
Tabla 4.17 P-Valores de los factores de emisión g/kg de combustible seco consumido	51
Tabla 4.18 P-valores de los factores de emisión por energía liberada.....	52
Tabla 4.19 P-valores para factores de emisión por energía útil	52
Tabla 4.20 P-valores de las tasas de emisión g/min	53
Tabla 4.21 P-valores de factores de emisión g/kg de combustible seco consumido	53
Tabla 4.22 P-valores para factores de emisión por energía entregada.....	54
Tabla 4.23 P-valores para factores de emisión por kg de masa de alimento	54
Tabla 4.24 P-valores tasa de emisión g/min.....	55
Tabla 4.25 P-valores tasa de emisiones fugitivas o intradomiciliarias.....	55
Tabla A.7.1 Distribución de tamaño de partícula de las muestras.....	66
Tabla A.7.2 Análisis elemental de los pellets producidos.....	67

Nomenclatura

A. Pellet de aserrín de pino.

ANOVA. Análisis de Varianza.

AT. Pellet de aserrín de pino con aserrín de pino torrefactado.

BC. Carbono negro.

C. Carbono.

CCT. Prueba de cocinado controlado (Control Cooking Test).

CH₄. Metano.

CO. Monóxido de carbono.

CO₂. Dióxido de carbono

GEI. Gases de efecto Invernadero.

H. Hidrógeno.

IEA. Agencia Internacional de Energía.

LEMS. Sistema portátil de Medición de Emisiones.

LINEB. Laboratorio de Innovación y Evaluación en biocombustibles sólidos.

MCE. Eficiencia modificada

N. Nitrógeno.

NMHC. Hidrocarburos no metánicos.

P. Pellet de poda de arándano.

PCI. Poder calorífico Inferior.

PCS. Poder calorífico superior.

PM_{2.5}. Material particulado de 2.5 micrómetros

PNUD. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

PT. Pellet de poda de arándano torrefactada.

S. Azufre.

WBT. Prueba de ebullición de agua. (Water Boiling Test).

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Aún con tantas limitaciones, a base de esfuerzo y mucha voluntad se siguen formando profesionistas capaces e íntegros.

Agradezco a la facultad de Ingeniería Química y a su División de Estudios de Posgrado por permitirme cumplir mis metas de formación académica.

De igual modo, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) por abrirme un espacio en la Unidad de Ecotecnologías en el Laboratorio de Innovación y Evaluación, facilitándome equipos para desarrollar este trabajo de tesis, así como a todo su personal técnico y académico, siempre al pendiente y en disposición para apoyarme.

Agradezco también al Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada por su apoyo en el desarrollo experimental y al Laboratorio Nacional de Innovación Ecotecnológica para la Sustentabilidad (LANIES) por facilitarme el equipo gasificador, parte importante en esta tesis.

Agradezco al personal del IIES: de la Unidad de Tecnologías de la Información y Comunicaciones a la Ing. Atzimba López Maldonado, el M.I. Alberto Valencia García y el Dr. Heberto Ferreira Medina por todo el apoyo técnico y la infraestructura otorgada; del Laboratorio de Bioenergía, al M.C. Rene D. Martínez Bravo y de la Unidad de Ecotecnologías al M.C Alfredo Fuentes Gutiérrez, por su apoyo en facilitar vehículos, herramientas e insumos de papelería.

Le doy gracias a mis asesores, el Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y el Dr. Víctor Ruíz García, por su guía y por estar en cada paso del desarrollo de este trabajo. Les admiro y aprecio profundamente.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En los últimos años, la biomasa vuelve a hacer notable como fuente de energía. Actualmente se han realizado investigaciones para mejorar sus propiedades energéticas. La torrefacción, que es un tratamiento termoquímico, ha sido aplicada a materiales biomásicos para optimizar sus propiedades físicas, químicas y bioquímicas en procesos de gasificación y combustión (Simonic, M. *et al*, 2020; Chen, D. *et al* 2018; Białowiec *et al* 2017). Variables como la temperatura y el tiempo son cruciales en las características finales del material torrefactado, tal como lo indican estudios de Simonic *et al* (2020) donde utilizan residuos biomásicos de roble y concluye que, al exponerse a la torrefacción, estos materiales aumentan su hidrofobicidad y fragilidad, lo que resulta en un incremento de la triturabilidad. También fue observado que al aumentar el tiempo y la temperatura incrementa el poder calorífico, así como la pérdida de carbón e hidrógeno.

En cuanto a sus usos energéticos, la torrefacción permite un acercamiento a las propiedades del carbón vegetal, lo que permite su uso con altos índices de sustitución en las calderas de carbón para la producción de energía eléctrica sin modificaciones importantes (Li, J., *et al* 2012), lo que indica que las aplicaciones industriales de residuos biomásicos torrefactados muestran un potencial significativo (Zhang, S., *et al* 2018), es decir, la torrefacción añade características que permiten a estos residuos usarse como combustibles.

En el mismo sentido de búsqueda de eficientizar las propiedades de la biomasa como fuente de energía, la peletización es un tratamiento que en recientes años sobresale sobre otros combustibles sólidos procesados, incluso la IEA (2017) lo considera el biocombustible sólido procesado más común, teniendo un uso extendido en Europa con

finés de calefacción residencial y para la industria en sistemas combinados de calefacción y electricidad (Tauro, *et al* 2018).

Teniendo en consideración las ventajas de peletizar biomasa residual y de la torrefacción se han hecho estudios donde se torrefactan pellets y se observa un aumento en el poder calorífico y en la cantidad de humedad (Tito *et al*, 2009; Sarker *et al*, 2022). Así mismo se ha realizado primeramente el tratamiento de torrefacción para después peletizar (García, 2020; Sarker, *et al*, 2022), considera que la biomasa al someterse a temperatura durante el proceso de torrefacción modifica la composición, principalmente, el contenido de lignina, el cual es un aglutinante natural que presenta la biomasa y es crucial para la peletización (Stelte, *et al*, 2012), por ello, gran cantidad de estudios utilizan aditivos que le permitan al material densificarse como lo haría en su estado natural (Cao *et al* 2015; García *et al*, 2018, Garcia *et al*, 2020).

Recientemente se han comparado pellets de residuos agrícolas como la cáscara de canola (*brassica napus*) y la cáscara de avena (*avena sativa*), usando como aditivo harina de mostaza, donde el proceso de torrefacción es previo y posterior a la peletización (Sarker, *et al*, 2022). En cuanto a calidad de los biocombustibles sólidos obtenidos, las propiedades mecánicas y físicas de los pellets de biomasa torrefactada (Esquema I) son superiores que los pellets torrefactados (Esquema II), el poder calorífico es ligeramente mayor para el segundo caso, y ambos requirieron la misma energía para el proceso. Finalmente, se requiere mayor investigación sobre la calidad del pellet y su aprovechamiento.

Hoy en día, alrededor de 55 EJ de bioenergía sólida son consumidos en el mundo, donde casi la mitad es biomasa usada para cocinar de manera tradicional y para la producción de carbón, sin embargo, este primer uso se ha convertido en una de las principales causas de la contaminación del aire en los hogares y muertes prematuras (IEA, 2022). Es destacable considerar que además del combustible, el diseño del dispositivo de uso final es importante para mejorar los desempeños energéticos y de emisiones.

Diversos estudios han realizado comparaciones en los desempeños de fogones tradicionales, estufas mejoradas e incluso gasificadores. Tal es el caso del estudio realizado por MacCarty *et al* (2008) en el que se utilizan tres dispositivos mejorados: una

estufa tipo rocket, un gasificador y un quemador de flujo forzado, además de un fogón de tres piedras y un dispositivo para combustión de carbón, los cuales fueron evaluados a través de pruebas de ebullición de agua (Water Boiling Test, WBT), donde los resultados son favorables para las tecnologías mejoradas, incluso el gasificador, con un ahorro de energía significativo y disminución de contaminantes.

Existen investigaciones relativas al uso conjunto dispositivos, Olmos (2019) en su trabajo de tesis utiliza una estufa Patsari con un micro-gasificador T-LUD adaptado, donde dicho complemento a la estufa resulta positivo, permitiéndole a la estufa tener mayor versatilidad en las tareas secuenciales, además demostrando que los pellets logran tener mayor eficiencia que otros biocombustibles solidos como las astillas o las tecatas. Dentro de sus recomendaciones sugiere analizar las emisiones del microgasificador que utiliza para comprobar la eficiencia de la combustión.

En consideración a lo dicho anteriormente, este trabajo pretende utilizar tratamientos en residuos agroforestales para que después estos sean utilizados en dispositivos mejorados y observar el desempeño energético y las emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2 Justificación

La creciente demanda energética aunada al agotamiento de los combustibles fósiles que han sido la principal fuente de energía desde la revolución industrial y que representa cerca del 90% de la matriz energética mundial, ha evidenciado la necesidad de tener alternativas energéticas basadas en fuentes renovables, como la biomasa, y usada mediante patrones de consumo medidos. Este trabajo busca aprovechar residuos lignocelulósicos, como la poda de arándano y el aserrín de pino, los cuales son considerados un problema en las comunidades donde se producen por su inadecuada disposición, principalmente en combustiones incontroladas a cielo abierto, lo que causa daños al ambiente y en la salud de las personas de la localidad.

El uso de leña para tareas de cocción y calefacción en fogones abiertos es considerado un problema que afecta directamente la salud de los usuarios (la mayor parte viven en zonas marginadas y de bajos recursos) debido a la contaminación del aire dentro del hogar por las combustiones ineficientes. Este trabajo, explora como una alternativa para el acceso a las energías limpias el uso de pellets de residuos agroforestales en gasificadores que realicen tareas de cocción, así como reducir el impacto ambiental.

Aprovechar los residuos agroforestales permitirá dar valor agregado a este tipo de biomasa residual, lo que permitirá impulsar nuevos procesos de producción, fomentar el desarrollo de economías locales de las comunidades, mitigar gases de efecto invernadero y mantener la calidad del aire en zonas rurales. El ampliar la gama de biocombustibles, permitirá al usuario contar con más opciones energéticas para cubrir necesidades básicas como la cocción, calefacción y calentamiento de agua, que actualmente se encuentran insatisfechas a nivel mundial, ya que se estima que 40% de la población a nivel mundial cocina con leña en fogones abiertos. Esta investigación contribuye a lograr el acceso a la energía limpia como una de las metas propuestas por los objetivos de desarrollo sustentable. (PNUD, 2015)

1.3. Planteamiento del problema

El uso de combustibles sólidos en dispositivos ineficientes para satisfacer tareas de cocción de alimentos y calentamiento de agua, que se da principalmente en comunidades rurales, ha tenido efectos adversos al ambiente y en la salud de los usuarios. Por ello, este trabajo busca transformar residuos agroforestales como el aserrín de pino y la poda de arándano, en combustibles que permitan mejorar su desempeño energético y mitigar emisiones al utilizarse en dispositivos adecuados para la cocción de alimentos.

1.4 Hipótesis

Se espera que la torrefacción de aserrín de pino y poda de arándano como insumo para producir pellets con fines energéticos en gasificadores que realizan tareas de calentamiento de agua y cocción de nixtamal, mejore el desempeño energético y mitigue emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los pellets de la misma biomasa sin torrefactar.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño energético y las emisiones de CO, CO₂ y PM_{2.5} en la combustión de los pellets a base de aserrín de pino, poda de arándano y biomasa torrefactada en ciclos de cocinado controlado y pruebas de ebullición de agua en un gasificador para tareas de cocción.

1.5.2 Objetivos particulares

1. Caracterizar cuatro tipos de pellets piloto de biomasa torrefactada con aserrín de pino y poda de arándano: análisis de proximales, poder calorífico y análisis elemental para elegir dos con las características que sugieran un pellet con mejor calidad.
2. Torrefactar aserrín de pino y poda de arándano en un reactor de pirólisis para posteriormente pelletizar mezclas de biomasa torrefactada con la materia prima.
3. Caracterizar mediante un análisis de proximales y de poder calorífico los pellets producidos.
4. Evaluar mediante ciclos de cocinado controlado (CCT) y pruebas de ebullición de agua (WBT) los pellets como combustible en un gasificador y medir los gases de efecto invernadero procedentes de la combustión.
5. Analizar estadísticamente los desempeños y las emisiones para cada pellet con un ANOVA para determinar la influencia del tipo de pellet y la torrefacción sobre las emisiones.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Biomasa y bioenergía

Se denomina biomasa a toda materia orgánica que proviene de los seres vivos. Hay diversas clasificaciones, una de ellas, de acuerdo con el origen, reconoce tres tipos de biomasa. En primer lugar, tenemos la biomasa natural, producida de manera espontánea en la naturaleza, tales como leños, ramas, hojas secas. En segundo lugar, tenemos la biomasa de cultivos energéticos, la cual considera aquellos cultivos sin fines alimentarios que son destinados para producir energía, como ejemplo se tiene el cereal y el sorgo. Por último, tenemos la biomasa residual, que incluye a los residuos generados por actividad humana, ya sea industrial, agrícola o ganadera que involucren materia orgánica, ejemplo de ello son las podas y efluentes ganaderos.

La elevada disponibilidad de biomasa en las diversas fuentes de donde se obtiene hace atractivo su aprovechamiento energético, en contraste con los combustibles fósiles, que han sido el principal suministro de energía desde la revolución industrial pero su agotamiento y los problemas ambientales que conlleva su uso muestra una necesidad de sustituirlos por fuentes renovables. La bioenergía, energía proveniente de la biomasa, se ha perfilado durante las últimas décadas como una alternativa renovable al uso de fuentes de energía fósiles, debido a su elevada disponibilidad y por ser un combustible neutral en cuanto a emisiones de carbono. Otras de las ventajas que presenta (García *et al*, 2013) se enlistan a continuación.

- a) La biomasa se puede almacenar, lo que permite planificar y dar certidumbre al suministro.
- b) Capacidad de transformación de biomasa para aumentar la densidad energética y facilitar el manejo.

- c) Se puede producir y utilizar local o regionalmente, evitando el transporte en largas distancias.
- d) Mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) debido al ciclo de carbono presente en la combustión de la biomasa.

Aunado a los beneficios anteriores, la bioenergía podría traer oportunidades de empleo a lo largo de la cadena de producción y una diversificación en las economías de producción. (Stefan, G. y Stefan, S., 2011)

2.2 Procesos de conversión de la biomasa

En la actualidad, la biomasa representa un 90% de las energías renovables en uso (IEA, 2017) y más de la mitad de la bioenergía en general implica el uso tradicional de biomasa, principalmente en los hogares para cocción y calefacción, pero también en pequeñas industrias (como hornos de carbón y hornos de ladrillos) (Stefan, G. y Stefan, S., 2011). Para dichas tareas, la biomasa, se expone a los mínimos tratamientos, sin embargo, esto puede limitar sus aplicaciones como combustible. Se han desarrollado pretratamientos y procesos de conversión de los que se obtienen biocombustibles para variados propósitos y de diferente naturaleza. En la Tabla 2.1 se consideran algunos tratamientos de la biomasa y procesos de conversión.

Los tratamientos mecánicos o físicos son los que emplean la tecnología más simple, ya que suelen ser molinos o trituradoras los que se destinan a estas actividades. Las técnicas de trituración y astillado ofrecen una manera práctica de transporte y uso de la biomasa, mientras que la compactación está referida a una densificación de la materia a una alta presión, como lo son las briquetas y pellets. En la Tabla 2.2 podemos encontrar ejemplos de los combustibles que se pueden obtener en los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Para fines de esta investigación nos enfocaremos en los combustibles sólidos.

Tabla 2.1 Procesos de conversión de la biomasa (Salinas y Gasca, 2009)

Tratamientos	Técnicas	Productos	Aplicaciones
Mecánicos	Astillado Trituración Compactación	Leñas, astillas, briquetas, aserrín	Calefacción, electricidad.
Termoquímicos	Pirólisis Gasificación	Carbón, aceites, gasógenos.	Calefacción, electricidad, transporte, industria química.
Bioquímicos	Fermentación Digestión anaeróbica	Etanol, biogás	Transporte, industria química, calefacción, electricidad.
Extractivos	Extracción fisicoquímica	Aceites, éteres, hidrocarburos.	Transporte, industria química.

Tabla 2.2 Tipos de Biocombustibles (Salinas y Gasca, 2009)

BIOCOMBUSTIBLES		
Sólidos	Líquidos	Gaseosos
Paja	Alcoholes	Gasógeno
Leña sin procesar	Biohidrocarburos	Biogás
Astillas	Aceites vegetales	(metano)
Briquetas y pellets	Ésteres derivados de	Hidrógeno
Triturados finos	aceites vegetales	
Carbón vegetal	Aceites de pirolisis	

2.2.1 Biocombustibles sólidos

Son considerados todos aquellos combustibles sólidos que, mediante una conversión termoquímica, generan calor o electricidad. Dentro de los más importantes en cuanto a uso residencial, destaca la leña, con 3 mil millones de usuarios a nivel mundial, siendo la cocción, la calefacción y el calentamiento de agua las principales tareas para las que se

utiliza. Las astillas de madera son más populares en los países desarrollados usándose en sistemas de calefacción pequeños y automatizados para generar calor y energía (Priyabrata, P., et al, 2018). Los países europeos como el Reino Unido, los Países Bajos, Dinamarca, Bélgica y Alemania son los principales consumidores de calor renovable, principalmente a partir de biomasa y residuos en forma de pellets para calefacción residencial (Dafnomilis, I., 2017). Los pellets de madera también se utilizan para la generación de bioenergía en países como China, Japón, Alemania, Reino Unido y Holanda. Por lo que podemos pensar en los pellets como un combustible emergente, para los cuales cada vez se desarrollan más dispositivos que permitan su uso de manera eficiente.

2.3 Pellets

Debido a que la biomasa en su estado natural cuenta con bajas densidades y por ende tiene altos costos de transporte, manejo y almacenamiento, el proceso de densificar la biomasa ya sea a través de briquetas o pellets, es notable. La elaboración de los pellets incluye, de manera resumida, los siguientes pasos: secado, reducción de tamaño y densificado, que están sujetos a las condiciones iniciales de la biomasa, obteniéndose como resultado pequeños cilindros de extremos rotos. Con el fin de evaluar los pellets existen parámetros diversos en los que centran las investigaciones al momento de su elaboración, los cuales están enfocados en características relacionadas al manejo, resistencia, almacenamiento, combustión, entre otras. La Tabla 2.3 resume los valores estándar para cada parámetro que propone Priyabrata *et al* (2017), así como los requeridos para la certificación de la norma ISO 17225-2, por medio de su manual *EnPlus*.

Tabla 2.3 Parámetros recomendados de la calidad de los pellets e importancia. (Priyabrata, et al 2017; ISO 17225-2, Manual EnPlus)

PARÁMETRO	VALOR ESTÁNDAR	SIGNIFICANCIA
Contenido de humedad (% en masa)	$\leq 10\%$ (a y b)	El contenido de humedad puede influir en tener un almacenamiento seguro y una combustión eficiente
Dimensiones (mm)	Diámetro de la matriz peletizadora ± 1 (a) Diámetro 6 ± 1 u 8 ± 1 (b) $3.15 \leq \text{Longitud} \leq 40.0$ (a y b)	Los pellets de longitud uniforme ayudan al flujo dentro del dispositivo de conversión de energía. Los diámetros pequeños ofrecen una tasa de combustión uniforme en comparación con los grandes.
Densidades (Kg/m ³)	Densidad: 1200 (a) Densidad a granel: ≥ 600 (a) Densidad: 660-680 (b) Densidad aparente: $600 \leq \text{Densidad} \leq 750$ (b)	La densidad del pellet influye en la combustión y tiempo de quemado, debido a que los espacios vacíos controlan el movimiento de oxígeno dentro del pellet La densidad a granel y compactada tienen influencia en el almacenamiento del pellet y su transporte.
Carga máxima de aplastamiento (kgf)	21-23kgf (a)	Está referido a la tensión de compresión debido al peso de los pellets superiores sobre los pellets inferiores durante el almacenamiento en contenedores o silos.
Durabilidad	$\geq 97.5\%$ (a y b)	Esta prueba simula la manipulación mecánica. La durabilidad es la relación entre el peso después de la rotación (abrasión) y el peso antes de la rotación, expresado como porcentaje.
Resistencia al impacto	$> 90\%$ (a)	Esta prueba trata de simular el vaciado de camiones al suelo de productos densificados, o de conductos a contenedores.
Resistencia al agua.	14-20% (a)	Puede considerarse como una medida del efecto de la humedad relativa del aire en la calidad de los pellets.

Contenido de cenizas	<5% (a) ≤2% (b)	Altos contenidos de ceniza disminuyen el poder calorífico y crea problemas de formación de residuos en el dispositivo donde se queme y de emisiones
Poder calorífico (MJ/kg)	>16.7 (a) ≥16.5 (b)	Indica el potencial energético durante la conversión termoquímica.

Notas: Las etiquetas (a) y (b) que tiene los parámetros designan lo siguiente:

(a) Valor recomendado por Priyabrata et al (2017)

(b) Valor para la certificación según la ISO 17225-2 en el manual EnPlus

En el mercado internacional, los pellets del sector forestal son los más comercializados, con aserrín como el principal componente, siendo Estados Unidos, Canadá y Rusia los principales exportadores al mercado europeo (IRENA, 2014; Macqueen, 2011; REN 21, 2012). Latinoamérica cuenta con pocas industrias desarrolladas para la producción de pellets en gran escala en países como Argentina, Chile y Brasil (Tauro *et al.*, 2018)

En el análisis realizado por Tauro *et al* (2018) acerca de la producción de pellets de biomasa en México, concluye que el mercado de pellets en el país tiene un potencial prometedor, aunque este se encuentre en desarrollo. Además, menciona que el potencial energético de mercado de los pellets de residuos forestales y agrícolas de disponibilidad inmediata oscila entre 131 y 233 PJ/año, lo cual podría reemplazar la demanda de gas natural y el 73% de la demanda de gas LP para calefacción residencial y comercial. En cuanto a las emisiones de GEI, se considera que podría mitigar potencialmente el 18% de las emisiones de la producción de electricidad en México.

El crecimiento en el consumo de pellets ha tenido como resultado diversidad tanto en la materia prima para su producción, como en su uso. En consecuencia, la industria ha comenzado a explorar con diversos materiales para la producción de pellets, tales como residuos provenientes de la industria agrícola, forestal, o combinación de estas. También se han investigado diversos tratamientos termoquímicos para la biomasa como pasos previos a la peletización como los tratamientos termoquímicos que pretenden mejorar las propiedades de la biomasa, por ejemplo, su poder calorífico y manejo. En el siguiente apartado se profundiza en la conversión termoquímica.

2.4 Conversión termoquímica

Dentro de la conversión termoquímica, cuyo principal objetivo es obtener energía térmica, se reconocen cuatro principales procesos (Basu, 2010):

- Combustión
- Pirólisis
- Licuefacción
- Gasificación

Las diferencias principales entre estos cuatro tipos de conversión termoquímica de la biomasa residen en la temperatura y el medio en que se lleva a cabo. La combustión implica altas temperaturas en la conversión de la biomasa con exceso de aire para obtener dióxido de carbono y vapor. La gasificación, por otro lado, involucra una reacción química en un ambiente deficiente en oxígeno. La pirólisis tiene lugar a una temperatura relativamente baja en ausencia total de oxígeno. En la licuefacción, las moléculas grandes de materia prima se descomponen en líquidos que tienen moléculas más pequeñas. Esto ocurre en presencia de un catalizador y a una temperatura aún más baja. La Tabla 2.4 presenta de manera resumida los contrastes entre estos cuatro procesos de conversión termoquímica.

Tabla 2.4 Comparación entre los cuatro principales procesos termoquímicos de conversión de la biomasa (Basú, 2010)

Proceso	Temperatura (°C)	Presión (MPa)	Catalizador	Secado
Licuefacción	250-330	5-20	Esencial	No se requiere
Pirólisis	380-530	0.1-0.5	No se requiere	Necesario
Combustión	700-1400	>0.1	No se requiere	No es esencial, pero puede ayudar
Gasificación	500-1300	>0.1	No es esencial	Necesario

La combustión puede definirse como una reacción exotérmica entre oxígeno e hidrocarburos en la biomasa, donde se obtienen principalmente dos productos; dióxido de carbono y agua. El descubrimiento de fuego es el proceso de conversión de biomasa a energía más antiguo que existe, siendo una combustión directa de la biomasa sin tratamientos.

2.4.1 Pirólisis y torrefacción

La pirólisis es una descomposición térmica de la biomasa, donde largas moléculas hidrocarbonadas se rompen en pequeñas moléculas de hidrocarburos obteniéndose productos líquidos, sólidos y gaseosos. El proceso de pirólisis consta de 3 etapas:

- Etapa 1. Se produce una descomposición lenta con producción de pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano. Esto es consecuencia de la ruptura de los enlaces debido a la alta temperatura a la que se lleva el proceso y consecuencia también de la liberación de gases retenidos en el carbón.
- Etapa 2. Se conoce como descomposición térmica activa. La temperatura aumenta y produce una fragmentación más profunda de la molécula de carbón, con la formación de hidrocarburos condensables y alquitranes. Esta etapa comienza alrededor de los 360°C, y finaliza cuando se han alcanzado temperaturas de 560°C aproximadamente.
- Etapa 3. Transcurre a temperaturas superiores a los 600°C, se caracteriza por la liberación gradual de hidrógeno y otros heteroátomos (Antonio, J., 2016)

La pirólisis tiene 3 variantes (Basu, 2010):

- Pirólisis rápida
- Pirólisis lenta
- Torrefacción

Las pirólisis rápida y lenta producen diferentes combustibles y se distinguen entre sí por el tiempo de residencia de la biomasa y las temperaturas que se manejan durante el proceso. La pirólisis rápida se lleva a cabo con velocidades de calentamiento arriba de 1000 a 10000°C/s, para alcanzar temperaturas de 650 a 1000°C, dependiendo del interés

del combustible objetivo que puede ser bioaceite o gas. La pirólisis lenta produce algo de gas y carbón sólido (uno de los combustibles más antiguos, utilizado para calentar y extraer metales antes del descubrimiento del carbón) y el tiempo de residencia puede durar días, a temperaturas relativamente bajas, aproximadamente 400°C.

La torrefacción es considerada una pirólisis leve en ausencia de oxígeno donde las temperaturas a las que se lleva a cabo no superan los 300°C. La biomasa que sufre este tratamiento tiene mejor eficiencia tanto como en gasificación como en la combustión (Basu, 2010). A continuación, se detallan las ventajas y características de la torrefacción como pretratamiento de la biomasa.

El proceso de torrefacción incluye un calentamiento en el intervalo de 230 a 300°C en un ambiente sin oxígeno, donde se aumenta la densidad energética, se reduce la relación oxígeno-carbono, O/C y la naturaleza higroscópica. La Tabla 2.5 muestra los cambios ocurridos durante la torrefacción en bagazo, para distintos tipos de residencia, que realizó en su investigación Pimchua *et al* (2009).

Tabla 2.5 Cambios en las propiedades del bagazo después de someterse a torrefacción a 250°C

Propiedad	Tiempo de torrefacción (min)		
	<i>15</i>	<i>30</i>	<i>45</i>
Rendimiento de la masa%(rm)	69	68.33	62
Rendimiento de la energía%(re)	88.86	91.06	83.23
Densidad energética (rm/re)	1.29	1.33	1.34
Energía requerida (MJ/kg producto)	2.34	2.58	2.99
Poder calorífico superior PCS (MJ/kg producto)	19.88	20.57	20.72
Incremento en el PCS (%)	22.34	24.96	25.51
PCS (MK/kg producto)	15.44	15.44	15.44
Energía neta (MJ/kg producto)	17.54	17.99	17.73

Con lo anterior, se puede decir que la torrefacción le brinda algunas ventajas a la biomasa para su uso como combustible, algunas de ellas son:

- Se reduce la relación O/C, lo cual mejora su eficiencia de gasificación
- Reduce los requerimientos de potencia para la reducción de tamaño y mejora el manejo
- La biomasa torrefactada absorbe menos humedad cuando es almacenada
- Se pueden producir pellets de biomasa de calidad superior con alta densidad energética.

Debido a sus características y las ventajas que presenta, la torrefacción facilita en la biomasa lograr el proceso de gasificación, la combustión directa e incluso, la producción de biopellets (Basu, 2010).

2.4.2 Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico en el que la materia carbonada es transformada en un gas combustible con poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren promovidas por altas temperaturas en presencia de un medio gasificante (Nogués y Galindo, 2010).

A diferencia de la combustión, cuya energía proviene de la ruptura de los enlaces, la gasificación (Basu, 2018) acumula energía en los enlaces químicos de los gases producidos. Agrega hidrógeno y elimina el carbono de la materia prima hidrocarbonada, para producir gases con reducciones en la tasa carbono-hidrógeno en el combustible (Ruíz, 2013). El medio gasificante o, también llamado, agente gasificante es de suma importancia, caso distinto a la pirólisis, con tres principales agentes utilizados: agua, aire y oxígeno. El poder calorífico y los productos están fuertemente influenciados en el tipo de medio gasificante.

Hay diversos tipos de gasificadores; grandes y pequeños, de tiro ascendente y descendente, entre otros. El gasificador Top-Lit UpDraft, (T-LUD) es utilizado con fines de cocción y calefacción, está caracterizado por su frente pirolítico migratorio que produce un flujo constante y controlable de gases combustibles mientras crea carbón vegetal. Esencialmente, estos llamados microgasificadores TLUD son estufas que queman gas, que crean sus propios gases y también productores de carbón que liberan gases combustibles utilizables (Anderson, P. 2016)

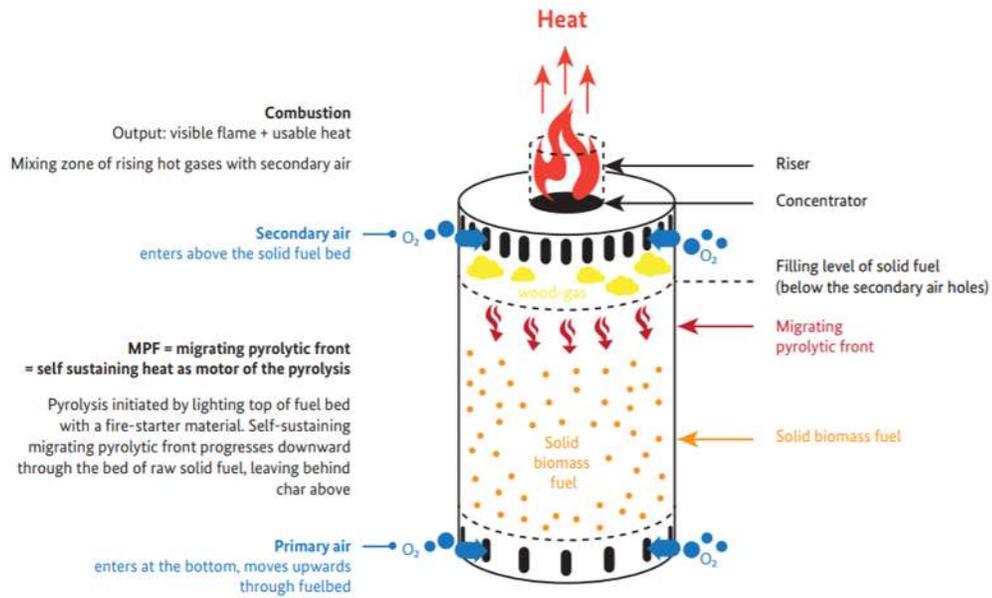


Figura 2.1 Componentes de un gasificador. (Roth et al, 2014)

La diferencia entre una estufa y en un gasificador principalmente reside en el ingreso de oxígeno primario que da pauta a la combustión inicial, la producción de gases (humo) y el ingreso de oxígeno secundario que al entrar en contacto con los gases produce una combustión secundaria. Considerando que los flujos de oxígeno primario y secundario en el gasificador son separados a diferencia del proceso de la mayoría de las estufas donde estos se mezclan. El control de flujo de oxígeno permite limpiar la combustión, además controla el ingreso de oxígeno reduciendo el enfriamiento y manteniendo el calor (Herrera, 2010).

Este estudio pretende utilizar el gasificador BioLite y P3 Chupiri para comparar desempeños energéticos y emisiones de gases de efecto invernadero con dos tipos de pellets de biomasa torrefactada en pruebas de ebullición y en ciclos de cocinado controlado, para así contrastar los resultados entre distintos biocombustibles sólidos.

2.5 Diseño de experimentos factorial

El diseño experimental es una herramienta que permite organizar y seleccionar la información a obtener de una secuencia de experimentos. En este caso se analizará el caso de cuando se tienen observaciones de un experimento que considera dos factores con repeticiones n completamente aleatorizadas de combinaciones del tratamiento. Estas quedan determinadas por a niveles del factor A y b niveles del factor B .

Las observaciones se podrían clasificar usando un arreglo rectangular, donde los renglones representan los niveles del factor A y las columnas representan los niveles del factor B . Cada combinación de tratamiento define una celda del arreglo. Así, se tienen ab celdas, cada una de las cuales contiene n observaciones. Se denota con y_{ijk} , la k -ésima observación tomada en el i -ésimo nivel del factor A y el j -ésimo nivel del factor B . (Montgomery, 2004). A continuación, la Tabla 2.6 muestra el arreglo para un diseño de experimentos de dos factores para n réplicas.

Tabla 2.6 Experimento de dos factores con n réplicas

A	B				Total	Media
	1	2	...	b		
1	y_{111}	y_{121}	...	y_{1b1}	$Y_{1..}$	$\bar{y}_{1..}$
	y_{112}	y_{122}	...	y_{1b2}		
		
	y_{11n}	y_{12n}	...	y_{1bn}		
2	y_{211}	y_{221}	...	y_{2b1}	$Y_{2..}$	$\bar{y}_{2..}$
	y_{212}	y_{222}	...	y_{2b2}		
		
	y_{21n}	y_{22n}	...	y_{2bn}		
...	
a	y_{a11}	y_{a21}	...	y_{ab1}	$Y_{a..}$	$\bar{y}_{a..}$
	y_{a12}	y_{a22}	...	y_{ab2}		
		
	y_{a1n}	y_{a2n}	...	y_{abn}		
Total	$Y_{.1.}$	$Y_{.2.}$...	$Y_{.b.}$	$Y_{...}$	
Media	$y_{.1.}$	$y_{.2.}$...	$y_{.b.}$		$\bar{y}_{...}$

Para cada observación de la Tabla 2.6:

$$y_{ijk} = \mu_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Para este caso, ϵ_{ijk} mide las desviaciones de los valores y_{ijk} observados en la (ij) -ésima celda a partir de la media de la población μ_{ij} . Si $(\alpha\beta)_{ij}$ denota el efecto de la interacción del i -ésimo nivel del factor A y el j -ésimo nivel del factor B , y α_i el efecto de la interacción del i -ésimo nivel del factor A , β_j el efecto del j -ésimo nivel del factor B , y μ la media conjunta, escribimos:

$$\mu_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij}, \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Entonces:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}, \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Tomando en consideración las siguientes restricciones (Ecuación 2.4-2.7):

$$\sum_{i=1}^a \alpha_i = 0 \quad \text{Ecuación 2-4} \quad \sum_{i=1}^a (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad \text{Ecuación 2-5}$$

$$\sum_{j=1}^b \beta_j = 0 \quad \text{Ecuación 2-6} \quad \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad \text{Ecuación 2-7}$$

Por lo tanto, las 3 hipótesis a probar se expresan a continuación:

1. $H'_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0,$
 $H'_1:$ Al menos una de las α_i no es igual a 0.
2. $H'_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0,$
 $H'_1:$ Al menos una de las β_i no es igual a 0.
3. $H'''_0 = (\alpha\beta)_{11} = (\alpha\beta)_{12} = \dots = (\alpha\beta)_{ab} = 0$
 $H'_1:$ Al menos una de las $(\alpha\beta)_{ij}$ no es igual a 0.

El procedimiento de prueba de hipótesis suele resumirse en una tabla del análisis de varianza, la Tabla 2.7 contiene los cálculos a realizar con las ecuaciones generales para el diseño factorial de dos factores en un modelo con efectos fijos.

Tabla 2.7 Fórmulas para el análisis de varianza para el diseño factorial de dos factores.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos A	SS_A	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamientos B	SS_B	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SS_T	abn-1		

La suma de cuadrados total (SS_T) se calcula mediante:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad \text{Ecuación 2-8}$$

Para los cuadrados de los efectos principales tenemos:

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad \text{Ecuación 2-9}$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

Ecuación 2-10

Para obtener SS_{AB} es conveniente realizar dos pasos. Primero calcular la sumade cuadrados entre los totales de las ab celdas, a las que se denomina la suma de cuadrados debida a los “subtotales”:

$$SS_{Subtotales} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

Ecuación 2-11

El segundo paso es calcular SS_{AB} como sigue:

$$SS_{AB} = SS_{Subtotales} - SS_A - SS_B$$

Ecuación 2-12

Para el caso de SS_E , este puede ser calculado por sustracción como:

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B$$

Ecuación 2-13

2.6 Comparaciones múltiples

En el caso dado de que el análisis de varianza indique que las medias de los renglones muestran diferencias, es de interés comparar de manera individual las columnas para identificar diferencias específicas.

La prueba de Tukey es un método de comparación múltiple que suele utilizarse después de un análisis de varianza en el que se ha rechazado la hipótesis nula de la igualdad de las medias de los tratamientos, esto con el fin de compararse las medias por pares. Por lo que tenemos las siguientes hipótesis:

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

$$H_0: \mu_i = \mu_j$$

Para toda $i \neq j$.

El procedimiento que propone Tukey aplica para las hipótesis en las que el nivel de significación global es exactamente α cuando los tamaños de las muestras son iguales, que es el caso al que se aplica en la presente investigación. Este procedimiento utiliza el llamado estadístico del rango estudentizado:

$$q = \frac{\bar{y}_{m\acute{a}x} - \bar{y}_{m\acute{i}n}}{\sqrt{\frac{MS_E}{n}}} \quad \text{Ecuación 2-14}$$

Donde $\bar{y}_{m\acute{a}x}$ y $\bar{y}_{m\acute{i}n}$ son las medias muestrales mayor y menor respectivamente, sacadas de un grupo de p medias muestrales. Generalmente los valores de $q_\alpha(p, f)$, representados en la ecuación 2.14, se encuentran en tablas de libros de estadística, donde α indica la confiabilidad y f es el número de grados de libertad asociados a MS_E . Para tamaños de las muestras iguales la prueba de Tukey declara que dos medias son significativamente diferentes si el valor absoluto de sus diferencias muestrales excede:

$$T_\alpha = q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad \text{Ecuación 2-15}$$

Para intervalos de confianza $100(1 - \alpha)$ en porcentaje, se puede construir la serie de la siguiente manera:

$$\bar{y}_i - \bar{y}_j - q_\alpha(p, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \leq \mu_i - \mu_j \leq \bar{y}_i - \bar{y}_j + q_\alpha(p, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad \text{Ecuación 2-16}$$

Lo que da pauta al cálculo para determinar si existen diferencias significativas en la comparación de medias por pares (Montgomery, D. 2004).

Capítulo 3

METODOLOGÍA

Este trabajo presenta continuidad a la tesis titulada “Obtención de metano y pellets de carbón vegetal a base de aserrín de pino y rastrojo de frutillas: rendimientos y potencial energético” (Álvarez, A. 2021) en el cual, se obtuvieron cuatro distintos tipos de pellets que se muestran en las Tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1 Mezclas propuestas para la producción de pellets de aserrín de pino y biomasa torrefactada

Mezcla	Cantidad de muestra en mezcla (% peso)			Humedad en la mezcla final (% peso)	Longitud del pellet (mm)
	Biomasa torrefactada	Aserrín de pino	de		
A1	60	40	40	17	
A2	60	40	40	13	

Tabla 3.2 Mezclas propuestas para la producción de pellets de rastrojo de frutillas y torrefactada.

Mezcla	Cantidad de muestra en mezcla (% peso)		Humedad en la mezcla final (% peso)		Longitud del pellet (mm)	
	Biomasa torrefactada	Poda de arándano	Ronda 1	Ronda 2	Ronda 1	Ronda 2
B1	60	40	40	55	6-10	10
B2	60	40	40	55	6-10	14

Tomando estos pellets como base, se continua con su caracterización para el desarrollo de esta investigación.

3.1 Caracterización de pellets

Para la caracterización de los pellets piloto y los pellets obtenidos en este trabajo, se llevaron a cabo análisis de proximales y potencial calorífico. Previamente se realizaron tratamientos de reducción de tamaño de muestras según la norma UNE-EN 14780:2012.

3.1.1 Proximales

Este análisis permite identificar qué porcentaje de la biomasa es donde se encuentra almacenada la energía, representada por los compuestos volátiles y carbono fijo, además de la fracción inerte, que concierne tanto a humedad, como a cenizas.

Humedad

El análisis de humedad que se le realiza a los pellets de manera general pasa el siguiente proceso: la porción de ensayo de biocombustible se seca a una temperatura de 105°C en atmósfera de aire hasta que se alcanza una masa constante y el porcentaje de humedad se calcula a partir de la pérdida de masa de la porción de ensayo (UNE EN ISO 18134-2:2017)

Cenizas

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material (Fernández *et al.*, 2014).

El método usado para determinar la cantidad de cenizas es el descrito en la norma UNE-EN ISO 18122:2015.

Volátiles

Para la determinación de los compuestos volátiles, se lleva a cabo el método propuesto en la norma UNE EN ISO 18123:2015. Este método consiste en calentar una muestra sin contacto con el aire ambiente a $900^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$, en un recipiente de peso constante anhidro conocido. El contenido de volátiles será la pérdida de la masa en este proceso.

Carbono fijo

Lopez D. (2013) explica que el carbono fijo es la fracción residual del combustible, descontadas las cenizas que queda tras la desvolatilización del mismo. El contenido de carbono fijo en la muestra se calculará con la siguiente ecuación:

$$\%Carbono\ fijo = 100 - (\%Volátiles + \%Cenizas) \quad \text{Ecuación 3-1}$$

3.1.2 Análisis elemental

Permite establecer el porcentaje en peso de los elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica: carbono (C), nitrógeno (N), y azufre (S).

Este análisis es realizado en el analizador de C, H (Hidrógeno), N y S de la serie *Thermo Scientific FLASH 2000*. El equipo está diseñado para la determinación de manera automatizada el porcentaje de C-H-N-S y C-H-N en muestras sólidas.

Basado en el Método Dumas modificado, el Analizador Elemental Flash 2000, ofrece una determinación exacta de C-H-N-S. La muestra se somete a pirólisis en un reactor de combustión de alta temperatura, a la que las sustancias tanto orgánica como inorgánica se convierten en gases elementales que, tras posterior reducción, se separan en una columna cromatográfica y se transfieren a un detector de conductividad térmica. La conversión total de la muestra a gases elementales sin dilución ni división garantiza el máximo grado de exactitud a partir de una cantidad muy pequeña de muestra (LANIES, 2016).

3.1.3 Poder Calorífico Superior

Es la energía total liberada cuando el subproducto es quemado, incluye el calor latente contenido en el vapor de agua; por lo cual representa la cantidad máxima de energía que se puede recuperar a partir de una fuente de biomasa determinada.

El poder calorífico superior (PCS) es obtenido en un calorímetro *6100 Parr* atendiendo a la norma ISO 18125:2017.

Poder Calorífico Inferior

El Poder Calorífico Inferior está referido al calor de combustión sin tomar en cuenta el calor de condensación del vapor del agua procedente de la humedad del combustible, es por ello que, para obtenerlo, es necesario conocer la humedad de la muestra. Con el PCS obtenido anteriormente, se realiza el cálculo que muestra la ecuación 3.2.

$$PCI = PCS - \text{Calor latente de vaporización de agua} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde:

PCS=Poder calorífico superior

PCI=Poder calorífico inferior

3.2 Torrefacción de la biomasa

El equipo para producir biomasa torrefactada para las mezclas de los pellets a obtener es el GASIFICADOR EMII-01 con una capacidad de carga que está en función del tamaño de partícula, pero se recomienda manejar cargas entre 200 y 300 gramos para evitar llevar la presión del equipo por arriba de los 10 kg/cm², además se puede manipular la temperatura en un rango de 0-400°C, a través de un panel controlado por termopares K, precisión de ±1°C, cuenta principalmente con con válvulas (Figura 3.1, Partes 3, 5, 6 ,7, 8, 9 y10) para dicha función y un manómetro (Figura 3.1, parte 4), que permite el monitoreo de la presión dentro del horno de pirólisis. Se estima que por cada lote se obtienen desde 100 hasta 140 gramos de producto, en función de la temperatura y el tiempo al que se someta la muestra.

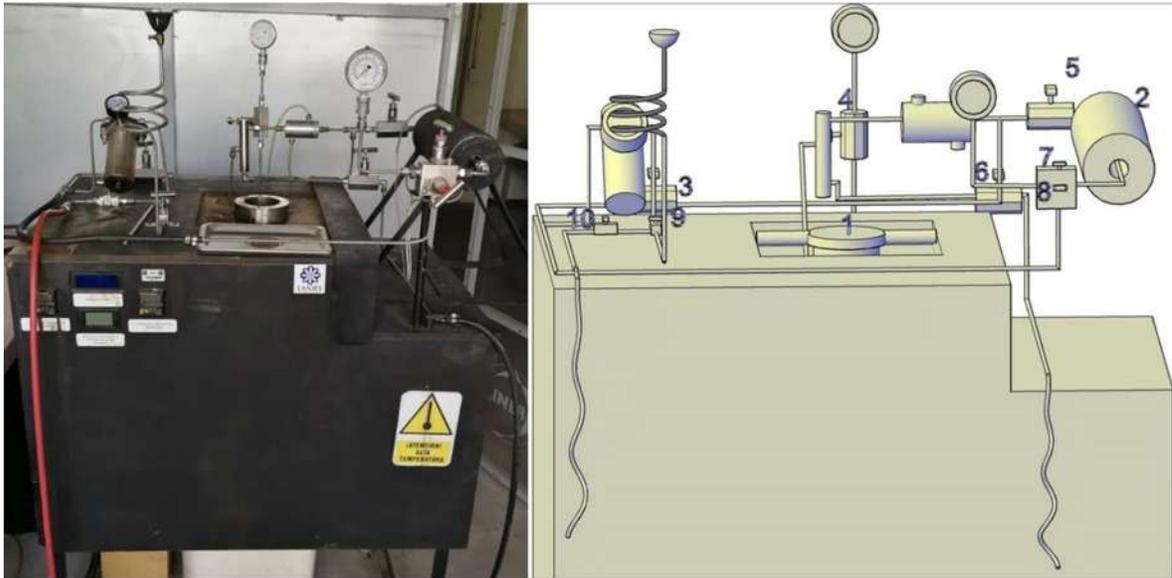


Figura 3.1 **Gasificador EMII-02 (Izquierda), Diagrama del gasificador (Derecha)**

El horno de pirólisis del reactor (Figura 3.1, parte 1) cuenta con un contenedor tubular de 65 cm de altura aproximadamente para insertar la materia prima (Figura 3.2), por lo que el primer paso para la torrefacción es conocer el peso de la canasta y el peso de la materia a torrefactar para después verterlo dentro de la canasta.

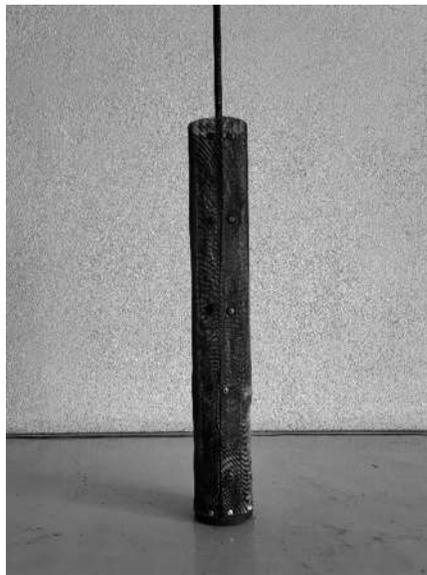


Figura 3.2 **Canasta del horno de pirólisis**

El gasificador se configura para alcanzar los 300°C previamente, entonces es introducida la canasta con el material y es cerrado, dejando abiertas las válvulas para la liberación de gases y extraíbles, monitoreando aumentos en la presión y la temperatura constante durante 45 minutos. Una vez pasado el tiempo, se deja enfriar el equipo a 250°C y se retira la canasta, la materia torrefactada es depositada en un contenedor para evitar su contacto con el aire y expuesta a temperatura ambiente con el fin de detener el proceso de pirólisis.

3.3 Producción de pellets

Una vez obtenida la biomasa torrefactada, se prepararon mezclas de ésta con materia prima para la peletización, aprovechando la lignina contenida en la biomasa natural para usarse como aglutinante del material torrefactado.

La producción pellets es un proceso que aún se encuentra en desarrollo en México, pese a que ha aumentado el mercado en los últimos años (Tauro *et al*, 2018), continúa realizándose de manera empírica. La producción de los pellets finales fue realizada en conjunto con la UNAM Campus Morelia y Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, AC. (GIRA), utilizando el equipo peletizador *Pellet Mill Meelko*, el cual tiene una capacidad de procesar 80-120 kg/h de pellets y cuenta con una matriz de 6 mm.



Figura 3.3 Peletizadora MEELKO y su matriz (Izquierda y derecha, respectivamente)

Para el procesamiento de pellets es importante que la materia a peletizar se humedezca previamente, cada tipo de pellets requiere una humedad distinta. Esta medida se toma usando el equipo *Grain Moisture Meter GM640* (Figura 3.4) el cual es capaz de medir la humedad en base húmeda y temperatura de granos de manera instantánea en un intervalo del 5%-30%.



Figura 3.4 Equipo GM640 para medición de humedad en granos

El método para producir pellets está basado en prueba y error, realizando corrida tras corrida variaciones en la humedad hasta obtener pellets de apariencia resistente. Por conocimiento de los operarios de la máquina peletizadora se sabe que los pellets de aserrín de pino, que son los más comerciales y que ellos producen con regularidad, necesitan un aproximado de 16% de humedad medida, por lo que este porcentaje representa el punto de inicio en las corridas para cada mezcla diferente.

Añadido este porcentaje se procede a colocar la mezcla humedecida en el embudo de la peletizadora, e iniciar la producción de pellets. Cuando la humedad no fue suficiente, los pellets que se producen tienen apariencia frágil y gran cantidad de la mezcla sale sin peletizar. En este caso se añade más porcentaje de humedad hasta el punto en que los pellets presenten una forma compacta y queden la menor cantidad de mermas posible.

3.4 Desempeño energético y emisiones de los pellets

Las siguientes pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB) el cual cuenta con una doble campana (Figura 3.5) para la separación, extracción, captura y medición de las emisiones de la chimenea e intradomiciliarias, con adaptaciones en la tubería de trenes para muestrear para acoplar los equipos que realizan esta función (Ruiz García *et al*, 2018)



Figura 3.5 Campana para captura de emisiones del LINEB

3.4.1 Prueba de ebullición de agua (WBT)

La prueba de ebullición del agua (WBT) es una simulación simplificada del proceso de cocción. Su principal objetivo es medir la eficiencia con la que un dispositivo de cocción usa combustible para calentar agua en una olla y la cantidad de emisiones producidas durante la cocción.

La metodología por seguir para la fase de alta potencia de arranque en frío, que es la elegida para este trabajo, es comenzar con el dispositivo a temperatura ambiente y se usa el biocombustible previamente pesado para hervir una cantidad medida de agua, en este caso 1.5 litros, en una olla estándar.

Para comenzar cada prueba, es necesario tomar en consideración algunos datos generales: peso del equipo gasificador y de la olla, tipo de combustible y cantidad añadida, cantidad de agua y su temperatura, temperatura ambiente.

Durante la prueba es monitoreado el tiempo y aumento de temperatura, así como las emisiones GEI. La evaluación finaliza una vez que se alcanza la temperatura de ebullición del agua, para la ciudad de Morelia el agua hierve a 92°C.

3.4.2 Protocolo CCT

La prueba de cocción controlada (CCT, por sus siglas en inglés) es una prueba de campo que mide el rendimiento de la estufa en comparación con los métodos de cocción tradicionales cuando un cocinero prepara una comida local predeterminada. El CCT está diseñado para evaluar el rendimiento de la estufa en un entorno controlado utilizando combustibles, ollas y prácticas locales (Clean Cooking Alliance, 2004).

Este trabajo lleva a cabo una de las tareas más usuales en las comunidades rurales: Nixtamalizado de maíz.

El dispositivo de cocción utilizado para esta tarea es el P3 Chupiri (Figura 3.6) una adaptación de un gasificador a la estructura de una estufa llamada Patsari nixtamalera, elaborado por Sánchez (2023), alimentado con los pellets de las mezclas de biomasa torrefactada obtenidos, en donde se evaluaron las emisiones de GEI total de combustible consumido, tiempo de cocción y energía consumida.

3.4.1 Medición de emisiones

El equipo utilizado para la medición de emisiones es el Sistema Portátil de Medición de Emisiones (LEMS, por sus siglas en inglés). Este utiliza un sensor electroquímico para medir emisiones de CO, el CO₂ se monitorea por medio de un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR por sus siglas en inglés) y el material particulado determinado por el método óptico (scattering, en inglés).



**Figura 3.6 Patsari Nixtamalera (Izquierda)
Gasificador P3 Chupiri (Derecha)**



Figura 3.7 **Sistema Portátil de Medición de Emisiones**

Se emplea también el sistema gravimétrico para determinar $PM_{2.5}$ en donde se emplea un ciclón o impactador de partículas para separar partículas menores a 2.5 micrómetros y capturarlas en filtros de fibra de vidrio de 37 mm, los cuales son pesados en una balanza antes y después de la prueba en condiciones controladas de temperatura y humedad. Los contaminantes se miden en tiempo real cada 9 segundos y los muestreos se realizarán a través de bombas de succión SKC con flujo a razón 4 l/min (Ruiz-García, *et al.* 2018; Ruiz-García, 2018).



Figura 3.8 **Bomba de succión (derecha) y ciclón (izquierda)**

Por otra parte, fue utilizado el cromatógrafo analizador de gases *Young Li Instrument 6500* (Figura 3.9), cuyo muestreo se realiza cada 10 minutos, detectando la presencia de hidrocarburos tales como metano, etileno, acetileno, propano, entre otros de cadena corta.



Figura 3.9 Cromatógrafo de gases Young Li

3.5 Análisis estadístico de las diferencias del desempeño energético y emisiones entre biocombustibles

3.5.1 ANOVA: Prueba Tukey

La experimentación realizada arroja como respuestas relacionadas variables en relación con diversos aspectos de 4 diferentes tipos de pellets. Cada tipo de pellet es diferente ya sea por el tipo de biomasa, aserrín de pino o poda de arándano, o por el tipo de tratamiento al que fue sometido. Para poder comparar cada tipo de pellet y observar si existen diferencias significativas entre ellos en lo que concierne a las variables que engloba el desempeño energético y las emisiones de su combustión fue realizado un análisis de varianza donde se compararon las medias individuales mediante la prueba de Tukey. Esta prueba crea diferentes intervalos de confianza para todas las diferencias por pares entre las medias de los niveles de los factores. El cálculo se define mediante un solo comparador, el cual es el resultante del producto del error estándar de la media por el valor tabular en la tabla de Tukey, usando como numerador el número de tratamientos y como denominador los grados de libertad del error.

3.5.2 ANOVA: *Diseño factorial general*

Con el fin de estudiar los efectos que varios factores pueden tener en una respuesta se utilizó un diseño factorial de experimentos. Este permite variar los niveles de todos los factores al mismo tiempo en lugar de uno a la vez, además hace posible estudiar las interacciones entre los factores.

Una vez realizados todos los experimentos correspondientes, prosigue llevar a cabo el análisis de varianza para los datos obtenidos en el diseño de experimentos. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores.

Aquí se presenta un diseño de experimentos donde los factores involucrados son el tipo de biomasa y el pretratamiento de torrefacción, con las variables de respuesta ya mencionadas anteriormente, que son los resultados obtenidos para el desempeño energético y emisiones. Cada tipo de experimento fue realizado un total de 5 veces. La combinación de los dos factores, con 5 repeticiones, resulta un total de 20 corridas experimentales para cada prueba realizada con los pellets. Esto fue aplicado tanto para las pruebas WBT como CCT.

En este caso se observa para cada valor de respuesta obtenido experimentalmente si existen diferencias significativas de acuerdo con el material del pellet y el procesamiento realizado previo.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1 Caracterización de los pellets piloto

Los pellets de mezclas torrefactadas fueron caracterizados en un análisis proximal, además de encontrando su poder calorífico superior y sus densidades de partícula y a granel. La Tabla 4.1 presenta el conjunto de los resultados.

Tabla 4.1 Caracterización de pellets piloto

Análisis	Pellet BT-AP 1 (280°C)	Pellet BT-AP 2 (310°C)	Pellet BT-PA 1 (280°C)	Pellet BT-PA 2 (310°C)
Humedad (%)	5.86±0.12	5.71±0.04	11.15±0.05	9.39±0.18
Materia Volátil (%)	69.51±1.15	69.13±1.23	67.53±1.23	68.42±0.39
Cenizas (%)	5.05±0.07	4.15±0.08	3.76±0.05	3.83±0.03
Carbono fijo (%)	25.43±0.61	26.72±0.65	28.70±0.64	27.75±0.21
PCS (MJ/kg)	21.90±0.09	22.99±0.11	22.31±0.08	22.66±0.11
Densidad a granel (g/cm ³)	0.501±0.002	0.458±0.003	0.452±0.003	0.532±0.003
Densidad de partícula (g/cm ³)	0.707±0.033	0.641±0.041	0.594±0.039	0.754±0.071

Nota: BT-AP y BT-PA está referido a la mezcla entre biomasa torrefactada con biomasa sin procesamiento, ya sea Aserrín de pino (AP) o Poda de Arándano (PA)

*La desviación estándar está incluida después del símbolo (±) para una n=5

De acuerdo con el “Esquema de certificación de calidad para pellets de madera” que muestra el manual *EnPlus* (EN ISO 17225-2:2014) existen 3 tipos de pellets: *EnPlus A1*, *EnPlus A2* y *EnPlus B*, los cuales quedan definidos por los valores de umbral de los parámetros considerados importantes para evaluar los pellets. La humedad que se señala en la norma debe ser menor al 10%, por lo que el pellet tipo BT-PA 1 no entra dentro de la clasificación de pellet de madera de calidad. Otra de las características en las que se rebasa el valor de umbral que marca la norma en todas las categorías es la cantidad de cenizas marcada como un máximo del 2%. Recordemos que las cenizas en conjunto con la humedad son el fragmento del biocombustible que es inerte. En la

caracterización mostrada, todos los pellets superan este límite de porcentaje de cenizas, quedando por este motivo fuera de la clasificación del manual *EnPlus*.

El poder calorífico se encuentra bajo norma, superando los 16.5 MJ/kg que exige el manual para los 4 tipos de pellets. Caso distinto a la densidad aparente, donde se requiere un mínimo de 600 kg/m³ y el máximo valor que se obtiene de los análisis es el del pellet BT-PA 2, con 532 kg/m³.

Además del contenido de cenizas, la dificultad en la conformación de los pellets es otro de los inconvenientes de las mezclas mencionados (Álvarez, 2021). De acuerdo con diversos estudios (Stelte et al 2012; García et al, 2020; Sarker 2022) la torrefacción modifica la composición de la biomasa: la lignina, el aglutinante natural disminuye y se aumenta el contenido de cenizas (Azargohar et al, 2019). Por ello, para los pellets a producir en este trabajo se propone una menor proporción de biomasa torrefactada en la mezcla, pasando de ser el 60% a 50% de biomasa torrefactada, siendo el complemento biomasa natural.

4.2 Torrefacción de la biomasa y peletización

La torrefacción de la biomasa para aserrín de pino y poda de arándano se llevó a cabo a la temperatura de 300°C, con 45 minutos de residencia. Se realizaron alrededor de 60 corridas para obtener aproximadamente 6 kg de biomasa torrefactada por cada materia prima. (Figura 4.1)



Figura 4.1 Torrefacción de materias prima

Para la peletización, se realizaron mezclas de la materia prima con la biomasa torrefactada en proporciones 50-50, esto es, menor proporción de materia prima torrefactada que la que muestran los pellets piloto analizados previamente (60%). Además de los pellets de mezclas, también se obtuvieron pellets únicamente de las materias primas con el fin de tener un blanco para realizar una comparación a través de su caracterización y evaluación de su uso en dispositivos de cocción. En la Tabla 4.2 se encuentran definidos los diferentes tipos de pellets de acuerdo con su composición y además su abreviación, que será utilizada a partir de este momento en el documento.

Tabla 4.2 Tipos de pellets y su composición

Abreviación del pellet	Materia prima del pellet	Composición (% peso)
A	Aserrín de pino	100% MPB
AT	Aserrín de pino+Aserrín de pino torrefactado	50% MPB- 50% MPT
P	Poda de arándano	100% MPB
PT	Poda de Arándano Torrefactada	50% MPB- 50% MPT

*Nota: MPB es la abreviación para materia prima base, que puede ser aserrín de pino o poda de arándano, MPT está referido a la materia prima torrefactada.

4.2.1 Pellets tipo A

Se peletizaron un total de 12 kg de aserrín de pino, proveniente de una maderería típica de la ciudad de Morelia. Se agregó agua con un aspersor hasta lograr una humedad medida de 16%. Estos pellets muestran una estructura compacta, sin grietas, además de una capa brillante que recubre su superficie (Figura 4.2).



Figura 4.2 Aserrín de pino húmedo (derecha) y pellets de aserrín de pino (Izquierda)

4.2.2 Pellets tipo AT

La producción de los pellets AT se llevó a cabo con mezclas en proporción 50% Aserrín de pino-50% Aserrín de pino torrefactado. A esta mezcla se le adicionó agua hasta llegar a un 24% de humedad detectado en el medidor *GrainMosture*. Este porcentaje se encontró después de repetir el proceso varias veces, buscando que la producción se realizara de manera homogénea, además de que los pellets obtenidos mostraran resistencia y saliera una cantidad mínima de pérdidas de materia prima. En la figura 4.3 se muestra una prueba piloto con un 16% de humedad donde se observan pérdidas de materia prima. Los pellets obtenidos muestran una superficie de textura lisa con un color café oscuro brillante en su mayoría.



Figura 4.3 Producto del primer intento de peletización de pellets AT (Derecha). Producto final, pellets AT (izquierda)

4.2.3 Pellets tipo P

Para producir pellets de poda de arándano, se encontró que la humedad necesaria tiene que alcanzar el 21%.



Figura 4.4 Cribado de la poda de arándano (Izquierda). Humedecimiento de la materia prima (Derecha)

Visualmente, estos pellets muestran más brillo que los pellets de aserrín de pino, incluso longitudes mayores.



Figura 4.4 Pellets de poda de Arándano (Izquierda). Pellets PT (Derecha).

Para esta materia prima se realizó un tamizado previo a su peletización con una criba del No. 6, de este modo evitar contaminantes en la mezcla como piedras o trozos de la poda que no se molieron por completo y que no se pueden procesar en la peletizadora.

4.2.4 Pellets tipo PT

Al igual que los pellets AT, los pellets PT se realizaron en mezclas 50-50 en porcentaje para poda de arándano más poda de arándano torrefactada. Se encontró que la humedad requerida es 25%, donde los pellets obtenidos visualmente tienen un color negro con una superficie completamente uniforme. (Figura 4.4)

4.3 Caracterización de pellets tipo A, AT, P y PT

La caracterización llevada a cabo para los pellets piloto es replicada ahora para los pellets tipo A, AT, P y PT, se realizaron los análisis de proximales y de poder calorífico para los 4 distintos tipos de pellets, en este caso se tienen 2 clases de pellets que son mezclas con materia prima torrefactada y 2 clases de pellets que son considerados como los blancos o pellets puros, que fueron realizados únicamente con las materias primas.

Tabla 4.3 Caracterización de pellets producidos

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
Humedad%	8.59±0.04	9.79±0.17	5.71±0.19	5.81±0.09
Materia Volátil%	77.63±0.81	78.64±0.85	82.51±0.52	75.93±1.21
Cenizas %	1.7±0.03	1.14±0.09	1.94±0.03	2.95±0.11
Carbono fijo%	20.66±0.42	20.23±0.74	15.55±0.27	21.13±0.66
PCS (MJ/kg)	19.23±0.09	21.44±0.09	19.63±0.05	21.55±0.03

Nota: La desviación estándar queda indicada con el símbolo ±.

De acuerdo con el manual *EnPlus*, los 4 tipos de pellets entran dentro de la clasificación por tener un porcentaje de humedad menor al 10%. En cuanto a su porcentaje en cenizas, el tipo de pellet PT no entra dentro de ninguna clasificación al exceder el 2% en contenido de cenizas. El pellet de aserrín de pino y el pellet de poda de arándano se encaminan hacia la clasificación de pellet tipo *EnPlus* B. Mientras que el pellet AT se orienta hacia la clasificación de pellet tipo *EnPlus* A2, al considerar sus cenizas menores a 1.2%. (Figura 4.5)

Por otra parte, el poder calorífico de todos los pellets entra en el parámetro marcado por el manual, es decir, superan los 16.5 MJ/kg (Figura 4.6).

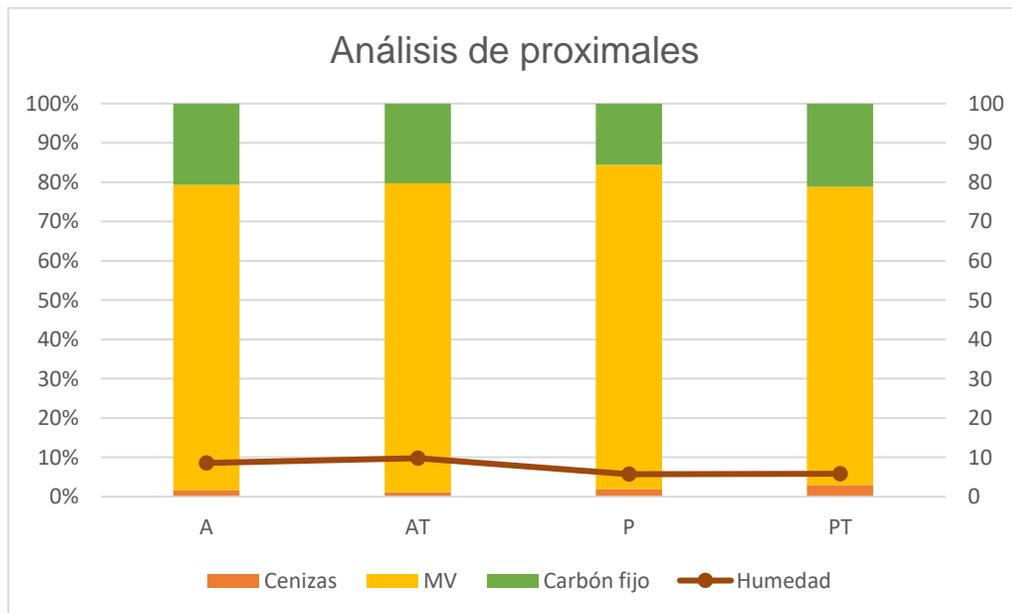


Figura 4.5 Caracterización: Análisis de proximales en porcentajes.

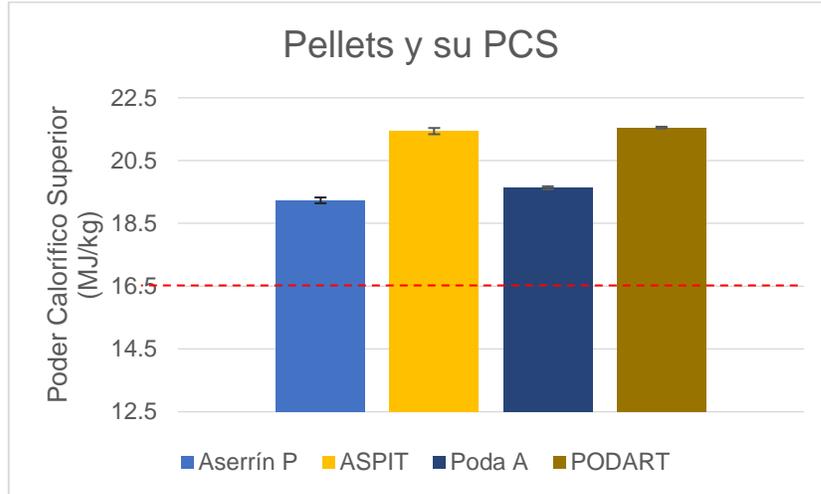


Figura 4.6 Caracterización de pellets: Poder calorífico superior. La línea intermitente roja marca el umbral de PCS para los pellets de calidad

4.4 Desempeño energético y emisiones de los pellets

4.4.1 Pruebas de ebullición de agua

Para las pruebas de ebullición de agua se utilizó el microgasificador Biolite Campstove (Figura 4.7). Se calentaron 1.5 litros de agua para cada repetición.



Figura 4.7 Microgasificador Biolite

La cantidad de biocombustible necesaria es importante, ya que la altura del lote de pellets contenido y la potencia están directamente relacionados, lo que a su vez repercute directamente en los resultados. Por ello, en cada tipo de pellet se realizaron pruebas

piloto utilizando cantidades aproximadas de 200-300 g de pellet. La cantidad de pellets encontrada como la adecuada fueron 250 gramos de pellets. Como iniciador de la prueba se tomaron 50 g de pellets de los pellets ya pesados y se humectaron en alcohol por dos minutos, por lo que se añadió un total aproximado de 10-15 g de alcohol.

Desempeño energético

En las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, se observan los resultados obtenidos de la experimentación para las pruebas de ebullición de agua con la desviación estándar (\pm) para $n=5$ y sus unidades correspondientes. Las literales agregadas al final de cada resultado (a,b,c,d) forman parte del análisis de la prueba de Tukey, que se explica en la siguiente sección. Previo a realizar el análisis estadístico de los datos, se observa para el desempeño energético que variables de respuesta como el tiempo, la eficiencia térmica del dispositivo y la energía útil, que los pellets de aserrín de pino procesados y sin procesar parecen ser superiores a los pellets de poda de arándano.

Tabla 4.4 Variables de respuesta del desempeño energético para las pruebas WBT

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
Tasa de quemado (g/min)	11.8 \pm 0.5 (a)	11.3 \pm 0.5 (a)	9.4 \pm 1.0 (b)	11.3 \pm 0.5 (a)
Eficiencia Térmica (%)	15.8 \pm 0.8 (a)	13.6 \pm 0.2 (b)	13.8 \pm 0.2 (b)	12.7 \pm 0.3 (c)
Potencia(kW)	3.5 \pm 0.2 (a)	3.8 \pm 0.2 (a)	2.9 \pm 0.3 (b)	3.8 \pm 0.2 (a)
Tiempo (min)	19.4 \pm 0.5 (b)	19.8 \pm 0.8 (b)	25.2 \pm 2.7(a)	20.8 \pm 0.8 (b)
energía útil (KJ)	640.1 \pm 32.4 (a)	604.5 \pm 8.5 (b)	593.8 \pm 9.8 (b)	598.8 \pm 13.6 (b)
Energía disponible (KJ)	4041.1 \pm 116.0 (d)	4431 \pm 20.4 (b)	4281.7 \pm 0 (b)	4728 \pm 0 (a)
MCE (%)	97.6 \pm 0.9 (a, b)	98.5 \pm 0.4 (a)	96.8 \pm 1.2 (b)	97.7 \pm 0.7 (a, b)

En cuanto a emisiones, es notorio un incremento en general de CO₂ emitido cuando los pellets son de material torrefactado, así como una disminución de CO y PM_{2.5}, lo cual, al ser validado estadísticamente, es considerado una reducción en cuanto a impactos a la salud.

Emisiones

Tabla 4.5 Factores de emisión g/kg de combustible seco consumido

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
CO₂	1111.3±48.2 (b)	1290.8±29.7 (a)	1227.5±29.3 (a)	1267.5±42.8 (a)
CO	17.3±6.4 (a, b)	12.8±3.9 (b)	25.8±9.5 (a)	19±5.9 (a,b)
CH₄	0.60±0.03 (b)	0.63±0.04 (b)	0.77±0.11 (a)	0.63±0.03 (b)
NMHC	0.27±0.16 (a)	0.14±0.03 (a)	0.20±0.08 (a)	0.14±0.09 (a)
PM_{2.5}	0.47±0.10 (b)	0.20±0.05 (c)	0.99±0.24 (a)	0.61±0.13 (b)
BC	0.14±0.12 (a)	0.12±0.02 (a)	0.28±0.03 (b)	0.29±0.05 (b)

Tabla 4.6 Tasa de emisión (g/min)

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
CO₂	13.09±0.58 (a, b)	14.56±0.48 (a)	11.57±1.16 (b)	14.38±1.01 (a)
CO	0.2058±0.0873 (a)	0.1440±0.0423 (a)	0.2392±0.0743 (a)	0.2155±0.0674 (a)
CH₄	0.0071±0.0003 (a)	0.0071±0.0003 (a)	0.0072±0.0005 (a)	0.0072±0.0005 (a)
NMHC	0.0031±0.0019 (a)	0.0016±0.0003 (a)	0.0018±0.0005 (a)	0.0016±0.0011 (a)
PM_{2.5}	0.0056±0.0013 (b)	0.0023±0.0004 (c)	0.0092±0.0014 (a)	0.0069±0.0014 (b)
BC	0.0017±0.0015 (b)	0.0014±0.0002 (b)	0.0026±0.0003 (a,b)	0.0033±0.0006 (a)

Tabla 4.7 Factores de emisión por energía útil (g/MJ)

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
CO₂	397.32±24.42 (b)	476.66±16.06 (a)	488.26±16.67(a)	498.90±28.34 (a)
CO	6.14±2.18 (a,b)	4.73±1.44 (b)	10.22±3.63 (a)	7.48±2.37 (a,b)
CH₄	0.2145±0.0161 (b)	0.2335±0.0139 (b)	0.3040±0.0393 (a)	0.2498±0.0139 (b)
NMHC	0.0978±0.0621 (a)	0.0533±0.0102 (a)	0.0800±0.0308 (a)	0.0554±0.0365 (a)
PM_{2.5}	0.1682±0.0354 (b, c)	0.0751±0.0169 (c)	0.3930±0.0901 (a)	0.2405±0.0489 (b)
BC	0.0488±0.0431 (a)	0.0461±0.0093 (a)	0.1116±0.0132 (b)	0.1129±0.0202 (b)

Tabla 4.8 Factores de emisión por energía liberada por el combustible (g/MJ)

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
CO₂	62.84±2.73 (b)	65.01±1.49 (a, b)	67.57±1.61 (a)	63.12±2.13 (b)
CO	0.9763±0.3641 (a, b)	0.6453±0.2003 (b)	1.4198±0.5253 (a)	0.9462±0.2945 (a,b)
CH₄	0.0339±0.0019 (a)	0.03109±0.0019 (a)	0.0421±0.0059 (b)	0.0316±0.0013 (a)
NMHC	0.0152±0.0093 (a)	0.0073±0.0015 (a)	0.0111±0.0044 (a)	0.007±0.0046 (a)
PM_{2.5}	0.0267±0.0059 (b)	0.0102±0.0023 (c)	0.0545±0.0131 (a)	0.0305±0.0064 (b)
BC	0.0078±0.0069 (b, c)	0.0063±0.0012 (c)	0.0155±0.0018 (a)	0.0143±0.0023 (a, b)

4.4.2 Protocolo CCT

Para llevar a cabo los ciclos de cocinado controlado, se utilizó el equipo P-3 Chupiri (Figura 8), en cada prueba fueron pesados 20 kg de agua y 8 kg de maíz.



Figura 4.8 Esta secuencia de 3 figuras muestra el pesado de pellets con el dispositivo P3 chupiri, su posterior encendido y finalmente su uso en la Patsari adaptada a la nixtamalera.

Se utilizaron como iniciador 30 g de alcohol y, como combustible, 1 kg de pellets para todos los casos.

Desempeño energético

Tabla 4.9 Parámetros del desempeño energético para las pruebas CCT

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
Tasa de quemado (g/min)	22.4±1.9 (a)	19±1.2 (b, c)	21.2±1.8 (a, b)	17±1.2 (c)
Potencia (kW)	6.1±0.5 (a)	5.7±0.4 (a)	6.1±0.5 (a)	5.4±0.3 (a)
Tiempo (min)	36.8±4.1(b)	41±3.2 (b)	41.2±3.4(b)	47.8±3.3 (a)
Energía disponible (kJ)	13341.2±892.1 (c)	13983.7±821.0 (b, c)	14979.8±139.5 (a, b)	15384.9±714.7 (a)
Eficiencia modificada(MCE) (%)	98.8±0.4(b)	99.5±0.1(a)	98.6±0.5(b)	98.6±0.3(b)

En la Tabla 4.9 se encuentran los resultados referentes al desempeño energético, donde parece ser que la torrefacción hace más lento el proceso de cocción y en general disminuye la tasa de quemado y la potencia.

Emisiones

Las tablas de resultados condensadas para las emisiones en el ciclo de cocinado controlado (Tablas 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13) parecen ser favorables para la torrefacción. Notablemente el PM_{2.5} disminuye en las emisiones intradomiciliarias para ambos materiales de pellets. (Tabla 4.13)

Tabla 4.10 Factores de emisión g/kg de combustible seco consumido

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
CO₂	1568.59±1111.51(b)	1835.97±99.51 (a)	1675.65±22.40(b)	1694.43±81.65(a)(b)
CO	12.14±4.94 (a)(b)	5.51±1.03 (b)	15.26±4.81(a)	14.92±3.33 (a)
CH₄	0.27±0.4 (a)	0.30±0.05 (a)	0.25±0.03 (a)	0.31±0.03 (a)
NMHC	0.14±0.03 (a)	0.09±0.01 (a)(b)	0.08±0.03 (b)	0.05±0.02 (b)
PM_{2.5}	0.09±0.04 (c)	0.12±0.06 (c)	0.40±0.03 (a)	0.30±0.05 (b)
BC	0.03±0.01 (a)(b)	0.03±0.00 (b)	0.03±0.01(a)(b)	0.05±0.02(a)

Tabla 4.11 Tasa de emisión (g/min)

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
CO₂	39.20±3.27 (a)	40.51±2.56 (a)	38.56±3.28 (a)	33.44±1.14 (b)
CO	0.2950±0.1070 (a, b)	0.1222±0.0263 (b)	0.3554±0.1350 (a)	0.2966±0.0786 (a)
CH₄	0.0067±0.0012 (a)	0.0066±0.0008 (a)	0.0057±0.0002 (a)	0.0061±0.0003 (a)
NMHC	0.0035±0.0007 (a)	0.0021±0.0004 (b)	0.0018±0.0009 (b)	0.0010±0.0004 (b)
PM_{2.5}	0.0022±0.0012 (a)	0.0026±0.0013 (a)	0.0092±0.0013 (b)	0.0060±0.0007 (c)
BC	0.0007±0.0002 (a)	0.0006±0.00007 (a)	0.0007±0.0002 (a)	0.0009±0.0003 (a)

Tabla 4.12 Factores de emisión por masa de alimento preparado (g/kg)

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
CO₂	51.87±3.63 (b)	60.21±3.45 (a)	57.08±0.81 (a, b)	58.42±3.43 (a)
CO	0.4013±0.1631 (a, b)	0.1807±0.0334 (b)	0.5197±0.1628 (a)	0.5142±0.1139 (a)
CH₄	0.0088±0.0012 (a)	0.0098±0.0018 (a)	0.0085±0.0010 (a)	0.0106±0.0011 (a)
NMHC	0.0046±0.0011 (a)	0.0031±0.0004 (a, b)	0.0026±0.0012 (b)	0.0017±0.0008 (b)
PM_{2.5}	0.0028±0.0013 (a)	0.0039±0.0021 (a)	0.0135±0.0009 (b)	0.0105±0.0018 (c)
BC	0.0010±0.0003(a, b)	0.0008±0.00007 (b)	0.0011±0.0003 (a, b)	0.0016±0.0006 (a)

Tabla 4.13 Tasas de emisión fugitivas o intradomiciliarias

	Pellet A	Pellet AT	Pellet P	Pellet PT
CO (mg/min)	2.1371±0.8308 (a)	1.9952±0.7648 (a)	2.1251±1.1769 (a)	2.2938±0.5301(a)
PM_{2.5} (mg/min)	0.6347±0.7347 (a)	0.9281±0.6339 (a)	1.1129±0.4230 (a)	0.1505±0.1714 (a)

4.5 Análisis estadístico de las diferencias del desempeño energético y emisiones entre biocombustibles

4.5.1 Prueba de Tukey

Aplicando la prueba de Tukey mediante un ANOVA fueron comparados los 4 tipos de pellets en el software MINITAB para corroborar si existen diferencias entre sí, con una confiabilidad del 95% ($\alpha=0.05$). Estas diferencias están expresadas con las literales agregadas (a, b, c, d) para cada resultado en las Tablas 6-14. Para cada fila, las respuestas que comparten letra no tienen diferencia estadísticamente significativa. Es decir, si observamos la primera fila de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que se refiere a la tasa de quemado, notamos que los pellets de la cuarta columna, pellet P, son los únicos que son estadísticamente distintos a los demás en la comparación por pares realizada por la prueba Tukey, por ellos podemos decir con 95% de confiabilidad que su tasa de quemado es menor que la de los pellets A, AT y PT, mientras que estos últimos 3 tipos de pellets no tienen diferencias estadísticas entre sí, ya que comparten la misma letra asignada en el modelo resultante (a).

4.5.2 Diseño factorial general: ANOVA

El diseño factorial general utilizado se muestra en la Tabla 15, con 5 repeticiones para cada experimento. Corriendo este diseño en MINITAB, fue realizado el análisis de varianza para observar la influencia de los factores sobre las diversas variables de respuesta a analizar, pertenecientes al desempeño energético y las emisiones evaluadas.

Tabla 4.14 Diseño factorial para análisis del efecto del material y procesamiento de pellets en el desempeño energético y emisiones.

Orden	Orden de la corrida	Material (A)	Procesamiento (B)
1	1	Aserrín pino	ST
2	2	Poda Arándano	ST
3	3	Aserrín pino	T
4	4	Poda Arándano	T
5	5	Aserrín pino	ST
6	6	Poda Arándano	ST
7	7	Aserrín pino	T
8	8	Poda Arándano	T
9	9	Aserrín pino	ST
10	10	Poda Arándano	ST
11	11	Aserrín pino	T
12	12	Poda Arándano	T
13	13	Aserrín pino	ST
14	14	Poda Arándano	ST
15	15	Aserrín pino	T
16	16	Poda Arándano	T
17	17	Aserrín pino	ST
18	18	Poda Arándano	ST
19	19	Aserrín pino	T
20	20	Poda Arándano	T

4.5.3 Desempeño energético

Para que un efecto sea significativo se tiene que: $P\text{-valor} \leq \alpha$, en este caso $\alpha=0.05$. Para practicidad, el P-valor de cada una de las variables de respuesta. Este valor indica si hay un efecto del factor o la interacción entre factores sobre la variable de respuesta. Las tablas de P-valor (Tablas 16-26) incluyen la relación para cada factor: material (X), procesamiento (Y), y la interacción entre estos factores (XY).

Pruebas WBT

Tabla 4.15 P- valores para las variables de respuesta del desempeño energético de las pruebas WBT.

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
Tasa de quemado (g/min)	X	0.001	Tiempo (min)	X	0
	Y	0.025		Y	0.009
	XY	0.001		XY	0.002
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
Eficiencia Térmica (%)	X	0	Energía útil (KJ)	X	0.006
	Y	0		Y	0.097
	XY	0.019		XY	0.025
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
Potencia(kW)	X	0	Energía disponible (KJ)	X	0
	Y	0.004		Y	0
	XY	0		XY	0.301
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
Carbón residual (g)	X	0.014	MCE%	X	0.053
	Y	0		Y	0.035
	XY	0.568		XY	0.95

Nota: X=Material, Y= Procesamiento, XY=Interacción de Material con procesamiento. En rojo se marcan las condiciones que no afectan significativamente la variable de respuesta

En este caso, se valida con 95% de confianza que las pruebas WBT el tipo de material utilizado (X) y el procesamiento de este (Y), así como la interacción de ambos factores (XY), afectan de manera significativa la tasa de quemado, la eficiencia térmica, la potencia, así como el tiempo en que se lleva a cabo la prueba. El carbón residual y la energía disponible solo son afectados por X e Y. Mientras que la energía útil es afectada por X y por la interacción XY. Finalmente, la eficiencia modificada (MCE), solo cambia significativamente cuando Y varía.

Las gráficas de efectos principales, así como las gráficas de interacción de efectos (APENDICE B), nos muestran que la torrefacción aumenta la eficiencia modificada, así como la potencia, tasa de quemado y energía disponible, caso opuesto con la eficiencia térmica y el tiempo. En el caso de la materia prima, el aserrín utilizado como base de pellets aumenta la potencia, eficiencia térmica, la tasa de quemado y la energía útil, mientras que la poda de arándano incrementa la energía disponible y el tiempo de duración de la prueba.

En cuanto a la interacción de efectos, la tasa de quemado y la potencia alcanzan su máximo cuando el material es aserrín de pino y éste es torrefactado, el tiempo es el mínimo para esta misma combinación. El aumento en energía útil, así como la eficiencia térmica, se ven favorecidas para los pellets hechos únicamente de aserrín de pino.

Pruebas CCT

Tabla 4.16 P- valores para las variables de respuesta del desempeño energético de las pruebas CCT

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
Tasa de quemado (g/min)	X	0.027	Tiempo (min)	X	0.003
	Y	0		Y	0.004
	XY	0.543		XY	0.466
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
Potencia(kW)	X	0.419	Energía disponible (KJ)	X	0
	Y	0.01		Y	0.118
	XY	0.38		XY	0.713
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
Carbón residual (g)	X	0.942	MCE%	X	0.003
	Y	0.023		Y	0.032
	XY	0.444		XY	0.053

Nota: X=Material, Y= Procesamiento, XY=Interacción de Material con procesamiento. En rojo se marcan las condiciones que no afectan significativamente la variable de respuesta

De acuerdo con la Tabla 4.16, la tasa de quemado, el tiempo y la MCE, con un 95% de confianza están afectadas significativamente por X e Y. En las mismas condiciones, el carbón residual y la potencia son afectados por Y. Mientras que la energía disponible está afectada por X.

La manera en que afecta el procesamiento de la materia prima de acuerdo con los gráficos de efectos principales (Apéndice B) es aumentando la eficiencia modificada, el carbón residual y el tiempo, mientras que disminuye la tasa de quemado y la potencia. Por otro lado, la poda de arándano como base aumenta la energía disponible y el tiempo de la prueba, mientras que el aserrín de pino hace esto mismo por la eficiencia modificada y la tasa de quemado. Las gráficas de interacción en este caso no son significativas, ya que de acuerdo con los resultados obtenidos no afectan las variables de respuesta

4.5.4 Emisiones

La Tabla 4.17 y 4.18, que se refieren a los factores de emisión por combustible seco consumido y los factores de emisión por energía liberada comparten los mismos resultados. El CO₂ es afectado por todos los factores, caso contrario a los hidrocarburos no metánicos, que no varían su respuesta dependiendo de esto, en el caso del monóxido de carbono y el carbono negro, únicamente se ven afectados por el tipo de material. En cuanto al metano, la interacción XY y X son los que afectan su respuesta y para el caso del material particulado, esto ocurre solo para los factores X e Y.

Pruebas WBT

Tabla 4.17 P-Valores de los factores de emisión g/kg de combustible seco consumido

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO₂	X	0	NMHC	X	0.462
	Y	0.016		Y	0.064
	XY	0.001		XY	0.503
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO	X	0.027	PM_{2.5}	X	0
	Y	0.082		Y	0
	XY	0.705		XY	0.42
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CH₄	X	0.007	BC	X	0
	Y	0.091		Y	0.909
	XY	0.009		XY	0.771

Para los factores de emisión por energía liberada (Tabla 4.18), el CO y PM_{2.5} son afectados significativamente por el tipo de material y el tratamiento. El metano varía con todos los factores y su interacción, el CO₂ únicamente se ve afectado por la interacción XY, el carbono negro por X y los NMHC por Y y XY.

Tabla 4.18 P-valores de los factores de emisión por energía liberada

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO₂	X	0.1414	NMHC	X	0.409
	Y	0.23		Y	0.032
	XY	0.002		XY	0.463
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO	X	0.037	PM_{2.5}	X	0
	Y	0.026		Y	0
	XY	0.669		XY	0.304
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CH₄	X	0.016	BC	X	0
	Y	0.001		Y	0.443
	XY	0.012		XY	0.934

La torrefacción influye aumentando el CO₂ y disminuyendo el CO, metano y PM_{2.5}, de acuerdo con las gráficas de efectos principales (Apéndice B). Los gráficos de interacción permiten observar que los mínimos para torrefacción, hablando de tasas de emisión, se encuentran en el pellet tipo AT para el CO, CH₄, PM_{2.5}, y pellet PT para el CO₂.

Tabla 4.19 P-valores para factores de emisión por energía útil

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO₂	X	0	NMHC	X	0.664
	Y	0		Y	0.069
	XY	0.003		XY	0.58
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO	X	0.008	PM_{2.5}	X	0
	Y	0.086		Y	0
	XY	0.567		XY	0.245
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CH₄	X	0	BC	X	0
	Y	0.111		Y	0.947
	XY	0.003		XY	0.859

Los valores resultantes de las tasas de emisión para cada componente medido muestran que el CO, los NMHC y el CH₄ no están afectados significativamente por los factores. El CO₂ y el PM_{2.5} dependen de ambos factores individuales y el carbono negro únicamente del material.

Tabla 4.20 P-valores de las tasas de emisión g/min

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO₂	X	0.042	NMHC	X	0.222
	Y	0		Y	0.111
	XY	0.102		XY	0.235
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO	X	0.112	PM_{2.5}	X	0
	Y	0.189		Y	0
	XY	0.549		XY	0.352
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CH₄	X	0.676	BC	X	0.002
	Y	0.769		Y	0.649
	XY	0.968		XY	0.281

Pruebas CCT

Si observamos los resultados para los p-valores de los factores de emisión por combustible seco consumido, notamos que coinciden con los factores de emisión por masa de alimento, donde el CO y el BC son afectados por el tipo de material, el metano por el tratamiento, los NMHC por ambos factores, y el PM_{2.5} por el tipo de material y la interacción XY de los factores y el CO₂ por el tratamiento y la interacción XY.

Tabla 4.21 P-valores de factores de emisión g/kg de combustible seco consumido

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO₂	X	0.66	NMHC	X	0.001
	Y	0.002		Y	0.011
	XY	0.005		XY	0.418
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO	X	0.002	PM_{2.5}	X	0
	Y	0.062		Y	0.163
	XY	0.087		XY	0.008
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CH₄	X	0.807	BC	X	0.023
	Y	0.015		Y	0.295
	XY	0.469		XY	0.076

Para los factores de emisión por energía entregada, el CO₂, se ve afectado de manera estadísticamente significativa por los factores y la interacción de estos, caso contrario al

BC, que no se ve afectado por ninguno de estos. El CO y NMHC dependen solo de los factores X e Y de manera individual. Ahora, para el PM_{2.5}, X y XY son los factores que lo afectan, para el metano este factor es únicamente Y.

Tabla 4.22 P-valores para factores de emisión por energía entregada

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO₂	X	0	NMHC	X	0
	Y	0		Y	0.004
	XY	0		XY	0.255
	Factor	P- Valor		Factor	
CO	X	0.005	PM_{2.5}	X	0
	Y	0.035		Y	0.066
	XY	0.075		XY	0.005
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CH₄	X	0.151	BC	X	0.063
	Y	0.046		Y	0.463
	XY	0.298		XY	0.073

Tabla 4.23 P-valores para factores de emisión por kg de masa de alimento

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO₂	X	0.231	NMHC	X	0.001
	Y	0.003		Y	0.011
	XY	0.021		XY	0.412
	Factor	P- Valor		Factor	
CO	X	0.001	PM_{2.5}	X	0
	Y	0.069		Y	0.172
	XY	0.082		XY	0.01
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CH₄	X	0.694	BC	X	0.014
	Y	0.015		Y	0.273
	XY	0.359		XY	0.066

Las tasas de emisión (Tabla 4.24) muestran que el PM_{2.5} está directamente relacionado con la variación de los factores X, Y y la interacción XY, siendo el caso contrario el BC y CH₄. Para el CO₂ se observa influencia únicamente de X, para el CO y NMHC únicamente no son afectados por la interacción XY.

En el mismo sentido para la tasa de emisión, el CO₂, el CO y el PM_{2.5}, así como los hidrocarburos no metánicos, la torrefacción permite que se disminuyan sus emisiones como se puede observar en los gráficos de interacción. La poda de arándano como base del pellet afecta las emisiones de NMHC y CO₂ disminuyéndolas. El aserrín de pino realiza esto mismo para el PM_{2.5}, CO y BC.

Tabla 4.24 P-valores tasa de emisión g/min

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO₂	X	0.006	NMHC	X	0
	Y	0.136		Y	0.002
	XY	0.017		XY	0.309
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO	X	0.014	PM_{2.5}	X	0
	Y	0.015		Y	0.014
	XY	0.201		XY	0.003
	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CH₄	X	0.039	BC	X	0.087
	Y	0.625		Y	0.967
	XY	0.461		XY	0.125

Finalmente, en las emisiones intradomiciliarias podemos ver como únicamente el material particulado se ve afectado y esto es por la interacción de ambos factores XY.

Tabla 4.25 P-valores tasa de emisiones fugitivas o intradomiciliarias

	Factor	P- Valor		Factor	P- Valor
CO	X	0.714	PM_{2.5}	X	0.541
	Y	0.973		Y	0.182
	XY	0.691		XY	0.019

En el caso de los gráficos de interacción de efectos (Apéndice B) para el PM_{2.5}, la torrefacción de la poda de arándano, pellet tipo PT, permite tener las menores concentraciones medidas, mientras que, para el aserrín de pino, es favorable a la disminución de emisiones no torrefactar la biomasa (Pellet A).

Capítulo 5

CONCLUSIONES

- De acuerdo con la caracterización de los pellets piloto, se excede la cantidad de cenizas recomendada por la ISO-17225 para los 4 tipos de pellets analizados, debido a esto y a la dificultad de compactación de los pellets por la disminución de lignina en el material torrefactado, se sugiere disminuir el porcentaje de biomasa torrefactada de 60% a 50% con el complemento de biomasa natural para los pellets que se elaboran en el presente estudio.
- La elaboración de pellets requirió un porcentaje de humedad distinto para cada caso: Pellets A: 16%, Pellets AT: 24%, Pellets P: 21%, Pellets PT: 25%. Estos pellets, a excepción del pellet PT, están en la clasificación de pellets de calidad según la caracterización y comparación con los valores propuestos por la norma ISO-17225 para biocombustibles sólidos, siendo el pellet A y P tipo EnPlus B y el pellet AT, tipo EnPlus A2. Para los dos tipos de materia prima utilizada, el PCS de los pellets con biomasa torrefactada aumenta con respecto a los pellets de biomasa natural.
- La peletización, con excepción en la energía útil para la prueba WBT y energía disponible para CCT para un $\alpha=0.05$ y una confiabilidad del 95% afecta significativamente el modelo de desempeño energético
- La torrefacción afecta significativamente las variables de respuesta del desempeño energético con un $\alpha=0.05$ y 95% de confianza, con excepción de la MCE en WBT y potencia y carbón residual para CCT.
- En cuanto a las emisiones para ambas pruebas, WBT y CCT, se inclinan a aumentar el CO_2 en los pellets con biomasa torrefactada y disminuir el CO, así como el $\text{PM}_{2.5}$, este último presentando diferencias particularmente notorias en las comparaciones por pares en la prueba de Tukey. En el caso del metano, la

torrefacción disminuye su producción únicamente para los pellets con base de poda de arándano.

- Ponderando tanto emisiones como desempeño energético, durante las evaluaciones WBT, se recomienda usar el pellet tipo AT.
- En las pruebas CCT, la evaluación muestra que el pellet tipo A tiene ventaja para el desempeño energético, mientras que, en las emisiones, el pellet AT es el que atenúa la mayor cantidad de éstas.
- Para el caso de las emisiones intradomiciliarias, únicamente el $PM_{2.5}$ está afectado por el cambio en tratamiento y el tipo de material en la interacción de estos dos factores, sin embargo, aunque para CO y $PM_{2.5}$ se observe la tendencia a disminución en materia prima torrefactada, no presentan diferencias estadísticas significativas entre sí.

Capítulo 6

RECOMENDACIONES A FUTURO

- Complementar la caracterización para las variables faltantes señaladas en la norma ISO-17225 para corroborar que los pellets de calidad cumplen con todos los aspectos que marca la norma.
- Aumentar la biomasa natural en las mezclas de los pellets tipo PT para observar si es posible que entre dentro del margen de contenido de cenizas sugerido por la norma ISO-17225.
- Se recomienda hacer pruebas de producción de pellets de biomasa torrefactada agregando algún aditivo para mejorar la resistencia mecánica y la conformación de los pellets.
- Realizar pruebas WBT con los pellets obtenidos en otros dispositivos de gasificación para contrastar resultados con el dispositivo utilizado en este trabajo
- Realizar pruebas de cocinado controlado en campo con diferentes tasas de ventilación para aterrizar el uso de estos combustibles en la vida cotidiana.

Capítulo 7

BIBLIOGRAFIA

- Anderson, P., Origins, History, and Future of TLUD Micro-gasification and Cookstove Advancement. Revisado en: <http://www.drtilud.com/>
- Álvarez, A. (2021) Obtención de metano y pellets de carbón vegetal a base de aserrín de pino y rastrojo de frutillas: rendimientos y potencial energético. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Azargohar, R., Soleimani, M., Nosran, S., Bond, T., Karunakaran, C., Dalai, A. K., & Tabil, L. G. (2019). Thermo-physical characterization of torrefied fuel pellet from copelletization of canola hulls and meal. *Industrial Crops and Products*, 128, 424-435.
- Basu, P. (2010). *Biomass, gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Editorial Elsevier, ISBN 978-0-12-374988-8.
- Białowiec, A., Pulka, J., Stępień, P., Manczarski, P., & Gołaszewski, J. (2017). The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product—Carbonized Refuse Derived Fuel. *Waste Management*, 70, 91-100.
- Chen, D., Gao, A., Cen, K., Zhang, J., Cao, X., & Ma, Z. (2018). Investigation of biomass torrefaction based on three major components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energy conversion and management*, 169, 228-237.
- Clean Cooking Alliance (2004) Controlled Cooking Test (CCT). Recuperado de: <https://www.cleancookingalliance.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/80-1.pdf>
- Congyu Zhang, Shih-Hsin Ho, Wei-Hsin Chen, Youping Xie, Zhenquan Liu, Jo-Shu Chang, Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their

- correlations with torrefaction severity index, *Applied Energy*, Volume 220, 2018, Pages 598-604, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.129>.
- Dafnomilis, I., Hoefnagels, R., Pratama, Y.W., D.L. Schott, G. Lodewijks, M. Junginger, Review of solid and liquid biofuel demand and supply in Northwest Europe towards 2030 – a comparison of national and regional projections, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 78 (2017) 31–45, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.108>
- EN 17225–2 (2014) Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets. ISO EN 17225–2:2014, European Standard, CEN European Committee for Standardization, Madrid, Spain, 14 pp
- Fernández Puratich H., Oliver Villanueva J., Valiente M., y col. (2014) Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y bosques*, 20(3), 97-111.
- García, C.A.; Riegelhaupt, E.; Maser, O. (2013) Escenarios de bioenergía en México: potencial de sustitución de combustibles fósiles y mitigación de GEI *Revista Mexicana de Física*, 59 (2), 93-103
- García, R., González-Vázquez, M.P., Pevida, C., Rubiera, F., (2018). Pelletization properties of raw and torrefied pine sawdust: effect of co-pelletization, temperature, moisture content and glycerol addition. *Fuel* 215, 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.027>.
- García, R., González M.P., Martín, A.J., Pevida, C., Rubiera, F. (2020) Pelletization of torrefied biomass with solid and liquid bio-additives. *Renewable energy*, 151, 175-183
- Herrera, J. (2010) Fabricación y evaluación de la estufa T-LUD con diferentes tipos de combustibles. Tesis de Licenciatura. Zamorano, Honduras.
- International Renewable Energy Agency Global (IRENA). Supply and demand projections – A Working Paper for REmap 2030; 2014.
- LANIES (2016) Equipos: Analizador elemental Thermo Scientific Flash 2000. Disponible en: http://www.lanies.unam.mx/?page_id=1812

- Li, J., Brzdekiewicz, A., Yang, W., & Blasiak, W. (2012). Co-firing based on biomass torrefaction in a pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching. *Applied Energy*, 99, 344-354.
- López, D. (2013). Valorización de biomasa de origen vegetal mediante procesos térmicos y termoquímicos. Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha, Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas, Departamento de Ingeniería Química, Ciudad Real.
- MacCarty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T. y Roden, C. (2008) A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy for sustainable development*, 12(2), 56–65.
- Macqueen D, Korhaliller S. Bundles of energy. The case for renewable biomass energy. 1st ed London: Natural Resource Issues No. 24. IIED; 2011.
- Marqués, S. (2010). Valorización de diferentes cultivos lignocelulósicos para la fabricación de pasta de papel: Caracterización química, modificación estructural de sus constituyentes orgánicos, durante los procesos de cocción y blanqueo y aplicaciones biotecnológicas. Tesis doctoral. (Facultad de Ciencias químicas, Universidad de Sevilla.)
- McKendry, P. (2002). “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass”. *Bioresource technology*, 83(37)
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., y col. Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests. 2017, *Development Engineering*, 2, 20.
- Montgomery, D. y Runger, C. (2003). Probabilidad y estadística aplicada a la Ingeniería. Segunda edición. Editorial Limusa
- Montgomery, D. (2004) Diseño y análisis de experimentos. Segunda edición. Editorial Limusa Wiley.
- Nogués, F., Galindo, D. (2010). Energía de la biomasa (Volumen 1). Zaragoza: Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza.

- Olmos, P. (2019) Evaluación de un microgasificador de biomasa adaptado a una estufa de leña para aplicación en comunidades rurales de México. Tesis de licenciatura. Universidad Carlos III, Madrid, España.
- Pimchua, A., Dutta, A., Basu, P., 2009. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties 8th world conference in Chemical Engineering, Montreal, paper 1815.
- PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Septuagésimo período de sesiones. Nueva York
- Priyabrata Pradhan, Sanjay M. Mahajani, Amit Arora, Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review, Fuel Processing Technology, Volume 181, 2018, Pages 215-232, ISSN 0378-3820, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>.
- REN21. 2012. Renewables 2012 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat)
- Ruíz, V. (2018) Evaluación comparativa del desempeño energético, emisiones intramuros y a la atmósfera de diferentes modelos de estufas eficientes de leña. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ruiz García, V. M., Edwards, R. D., Ghasemian, M., y col. (2018). Fugitive emissions and health implications of plancha-type stoves. Environmental science & technology, 52, 10848
- Sarker, T., Azargohar, R., Stobbs, J., Karunakaran, C., Venkatesh, M., Dalai, A. 2022. Complementary effects of torrefaction and pelletization for the production of fuel pellets from agricultural residues: A comparative study. Industrial Crops. 181 Elsevier
- Simoncic, M., Goricanec, D., & Urbancl, D. (2020). Impact of torrefaction on biomass properties depending on temperature and operation time. Science of the Total Environment, 740, 140086.

- Soto, G., Núñez, M. (2008). Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de *Pinus radiata* (D. Don), como material aglomerante. *Revista Maderas, Ciencia y Tecnología*. Universidad de Talca, Chile, 10(2), p 10
- Stefan Gold, Stefan Seuring (2011) Supply chain and logistics issues of bio-energy production. *Journal of Cleaner Production*, Volume 19, Issue 1, Pages 32-42,
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization—A review. *BioResources*, 7(3), 4451-4490
- Tauro, R., García, C., Skutsch, M., Masera, O. (2018) The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(1), 380-389.
- Tito Ferro, Daria; Beatón Soler, Pedro; Zanzi, Rolando. TORREFACCIÓN DE BIOMASA DENSIFICADA *Tecnología Química*, vol. XXIX, 2009, pp. 180-186 Universidad de Oriente Santiago de Cuba, Cuba
- Toledo, G. (2014). Síntesis de catalizadores de Ni/γ Al₂O₃ y su aplicación en la gasificación de residuos lignocelulósicos derivados del pino. Tesis de Maestría. (División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo).
- UNE-EN 14780:2012. Biocombustibles sólidos. Preparación de muestras.
- UNE-EN 15419-2 (2011). Determinación de la distribución del tamaño de partícula, parte 2: Método del tamiz vibrante con abertura de malla inferior o igual a 3.15 mm. AENOR, Madrid, España.
- UNE-EN ISO 18122:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de ceniza.
- UNE-EN ISO 18123:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil.
- UNE-EN ISO 18125:2017. Solid biofuels. Determination of calorific value.

Vazquez, J.C. (2017) Determinación de las emisiones intra-domiciliarias de los contaminantes CO y PM2.5 por el uso de la estufa Patsari, mediante la prueba de ebullición de agua WBT. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Civil, Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

APÉNDICE A

Análisis granulométrico

Con la finalidad de establecer el tamaño de partícula a utilizar se realizó para el aserrín de pino y la poda de arándano un análisis granulométrico siguiendo la norma UNE-EN 15149-2 (2011) en las instalaciones de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, donde se utilizó el equipo agitador de tamices de prueba *RO-TAP* modelo *RX-29*, como el que se observa en la figura A.7.1, admite 7 tamices de altura completa o 15 de media altura, con una charola inferior y cubierta superior.



Figura A.7.1 Agitador de tamices RO-TAP

En la Tabla A.7.1 se observan los resultados del análisis granulométrico, además se incluyen el número de malla que se utilizó, así como el tamaño de partícula especificado.

Tabla A.7.1 Distribución de tamaño de partícula de las muestras

	Número de malla	6	7	10	14	18	35	60	
	Tamaño de partícula	>3.35	3.35	2.8	2	1.4	1	0.5	<0.25
Aserrín de pino	Promedio % masa retenida	7.89	7.63	15.16	17.45	14.46	22.44	10.45	4.49
	SD	1.26	1.20	1.26	0.36	0.27	1.66	1.41	0.57
Poda de Arándano	Promedio % masa retenida	17.64	8.60	15.11	16.72	13.26	15.45	7.91	5.27
	SD	2.57	1.12	1.35	1.12	0.37	1.32	2.15	2.43

El análisis granulométrico consistió en 5 repeticiones de tamizaje por cada muestra donde después de pasar 5 minutos en el agitador se realizaba el pesaje tamiz por tamiz para verificar los pesos de la muestra que restaba en cada uno.

En las figuras 13 y 14, se observa la distribución de partículas para los dos tipos de muestra en sus 5 repeticiones, así como una comparación.



Figura A.7.2 Distribución de tamaños de partícula para Aserrín de pino (izquierda) y Poda de Arándano (derecha)

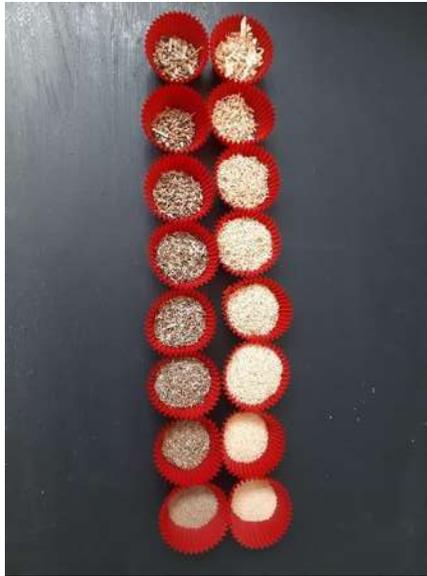


Figura A.7.3 Comparación de tamaños de partícula de Poda de Arándano (izquierda) y Aserrín de pino (Izquierda)

Análisis elemental

Tabla A.7.2 Análisis elemental de los pellets producidos

Pellet	N	C	S
A	0.8853	44.7718	1.30455
AT	0.9725	53.686	1.25415
P	1.3565	46.90975	1.2693
PT	1.4186	50.8421	1.29145

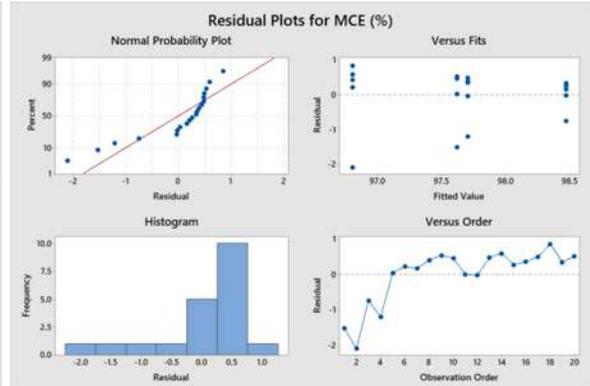
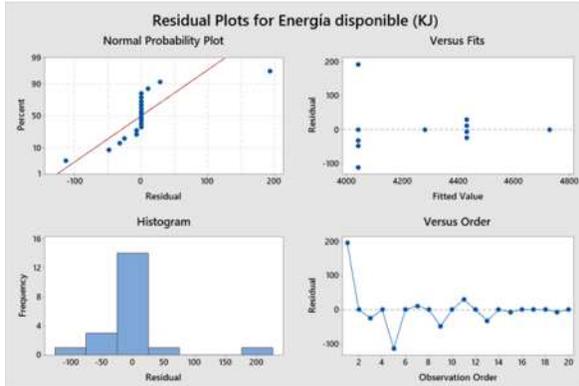
APÉNDICE B

Pruebas WBT

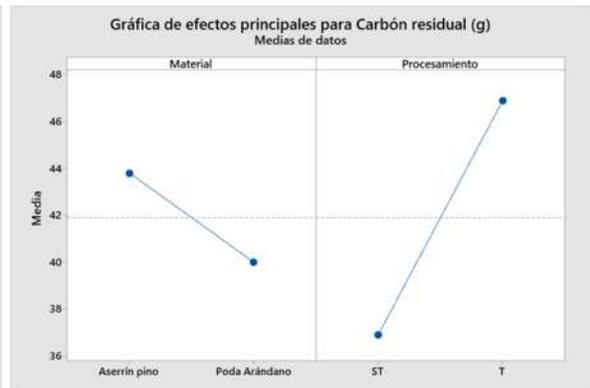
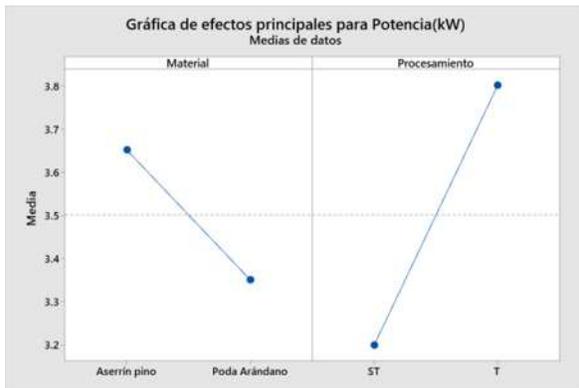
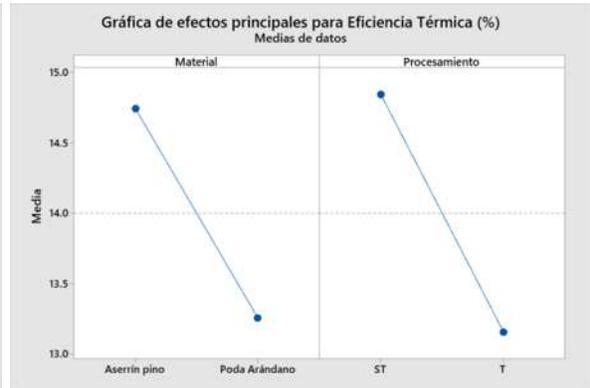
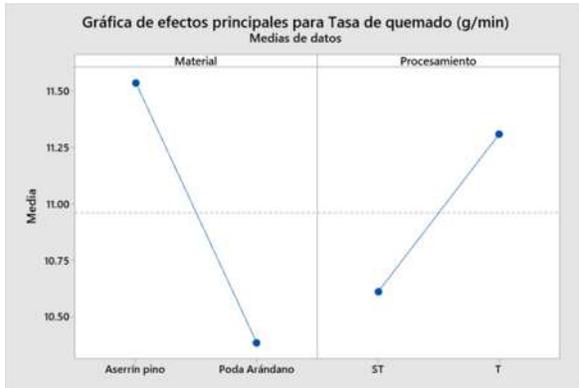
Desempeño energético

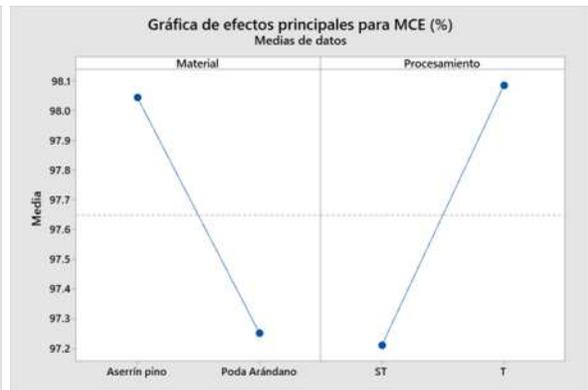
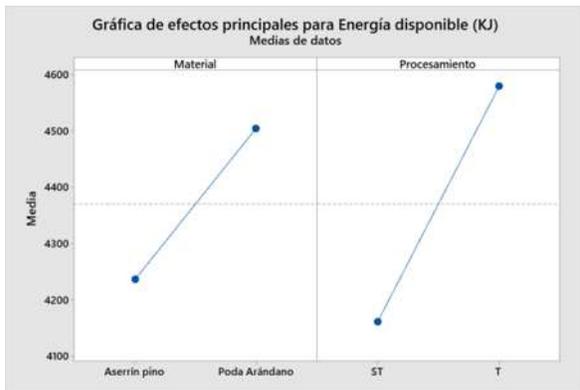
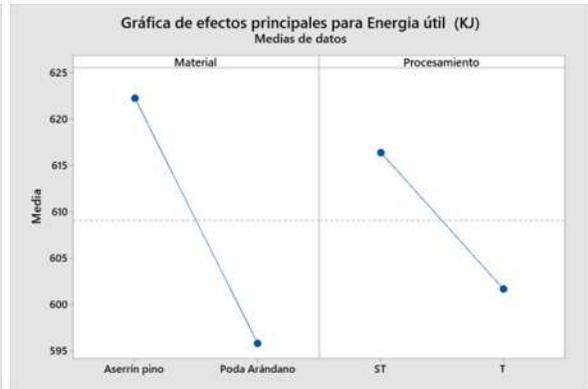
Gráficas de residuales



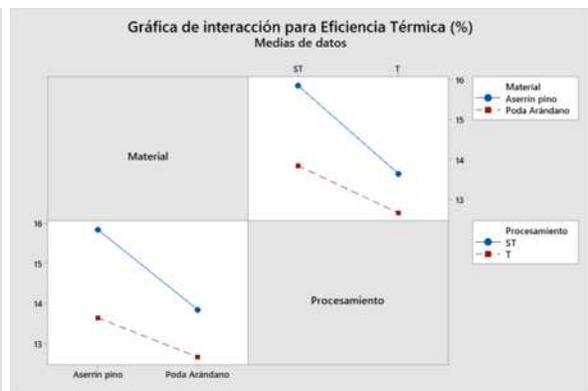
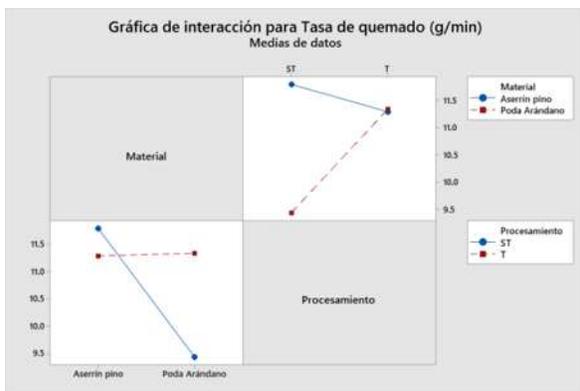


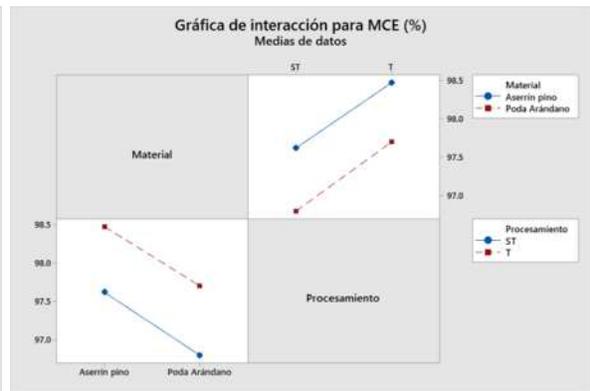
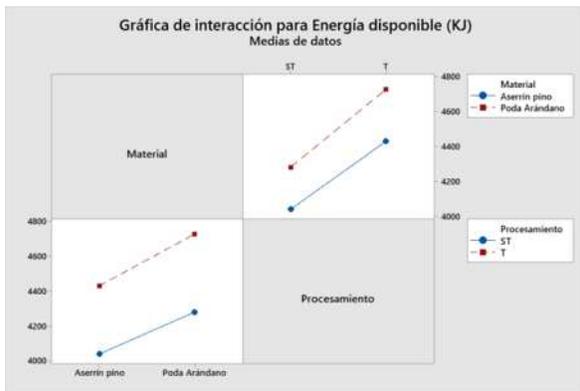
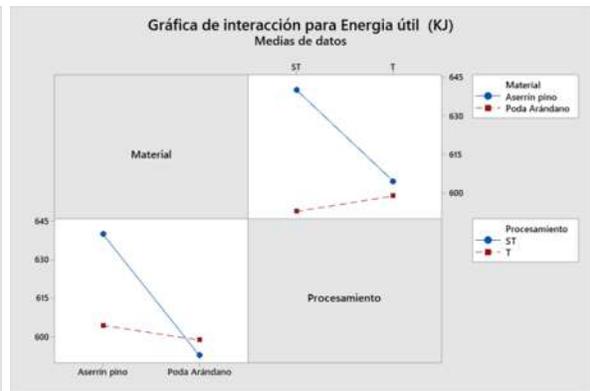
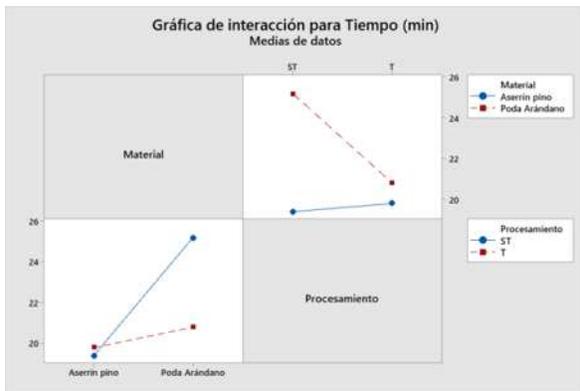
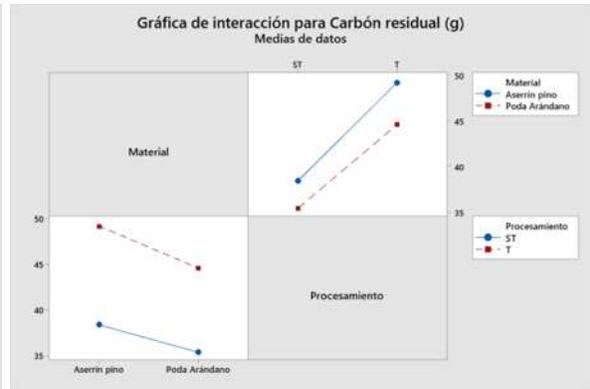
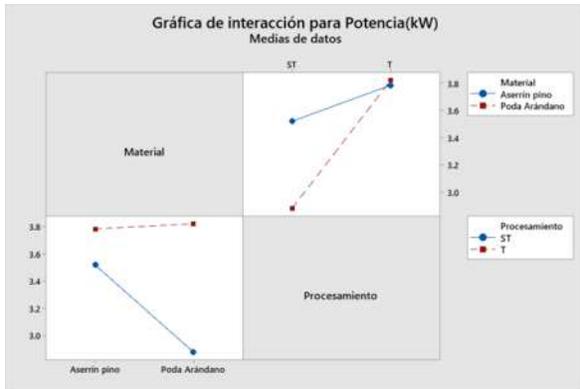
Gráficas de efectos principales





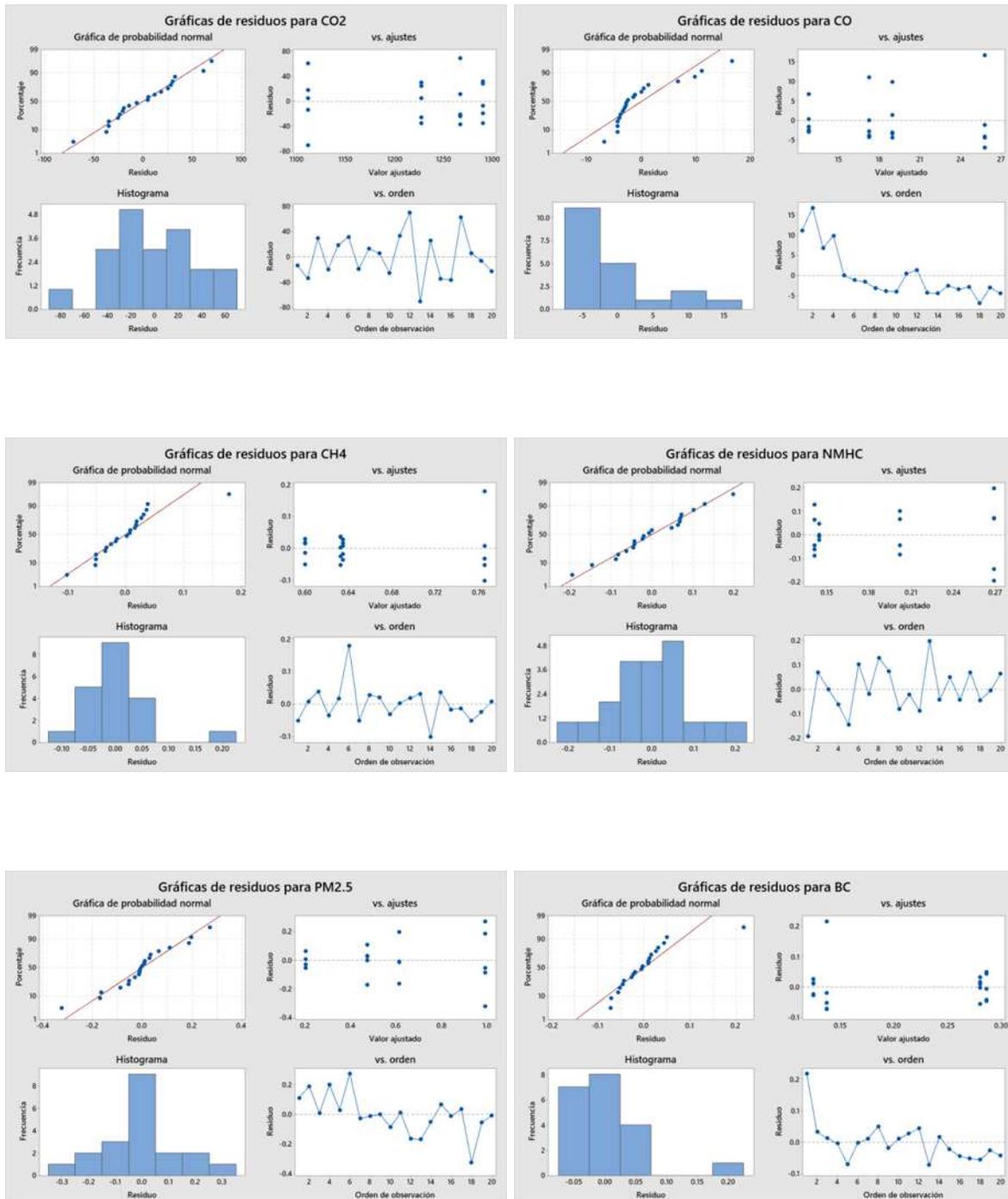
Gráficas de interacción de factores



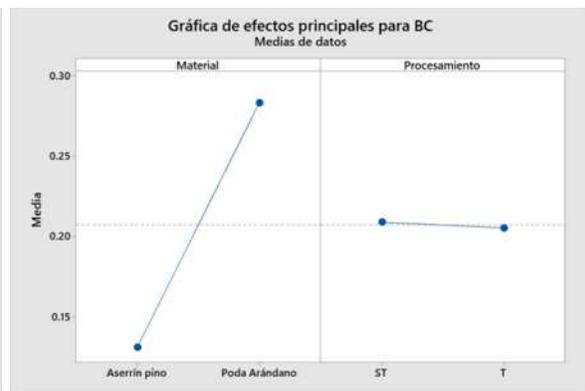
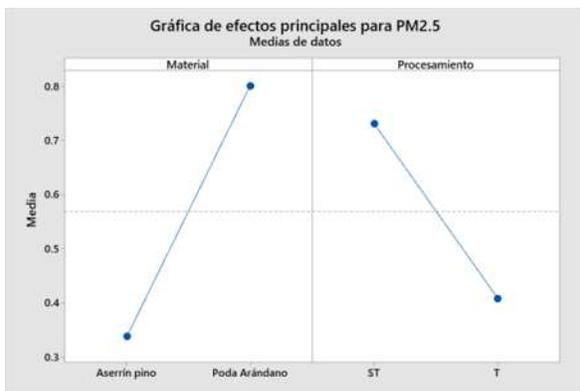
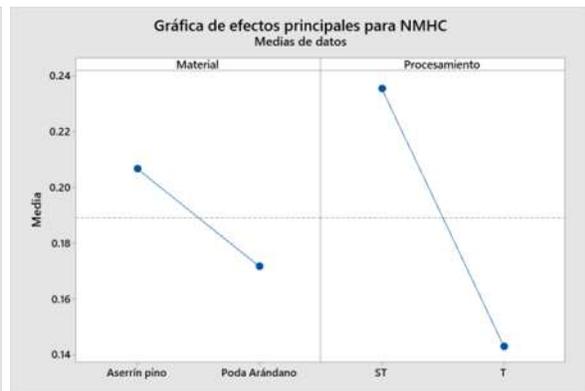
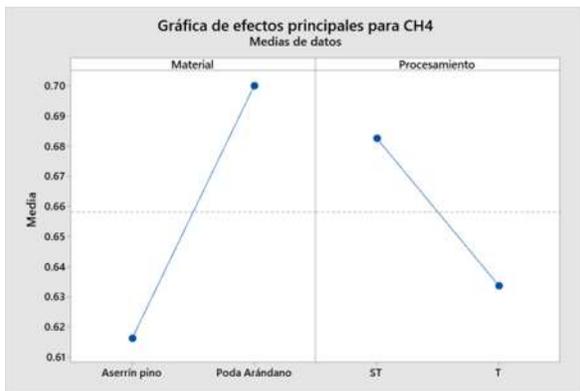
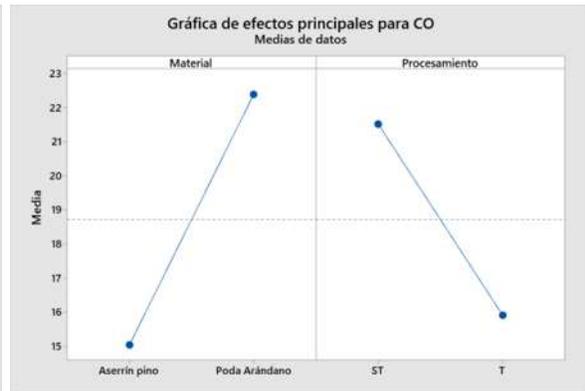
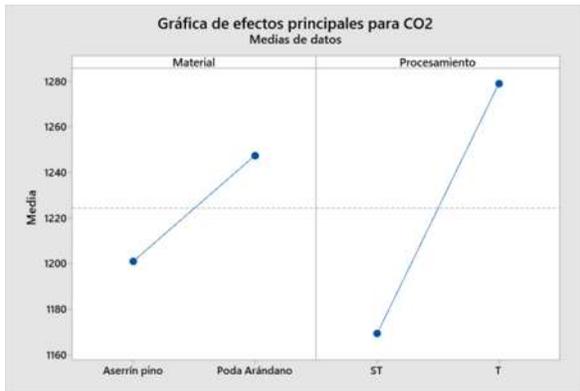


Factores de emisión por combustible seco consumido

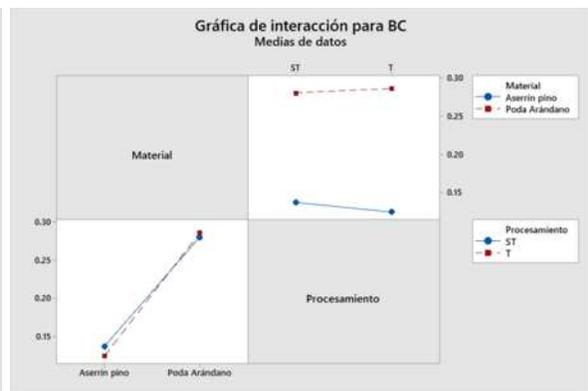
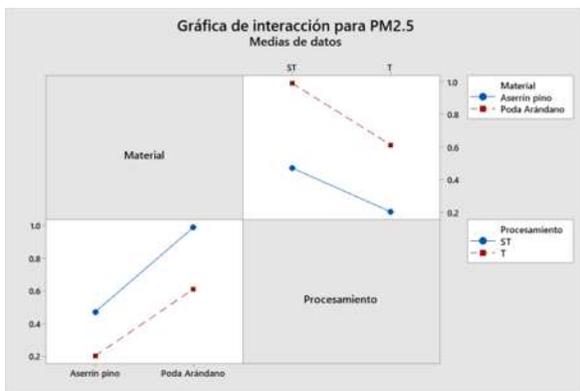
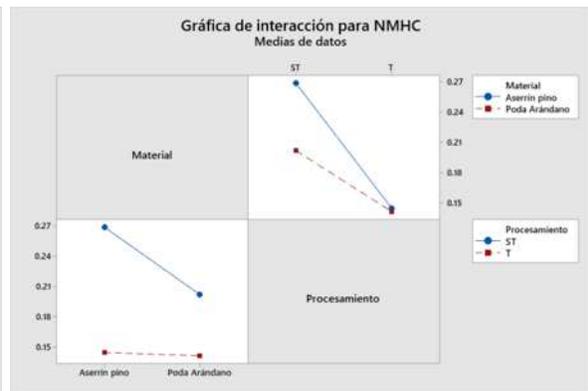
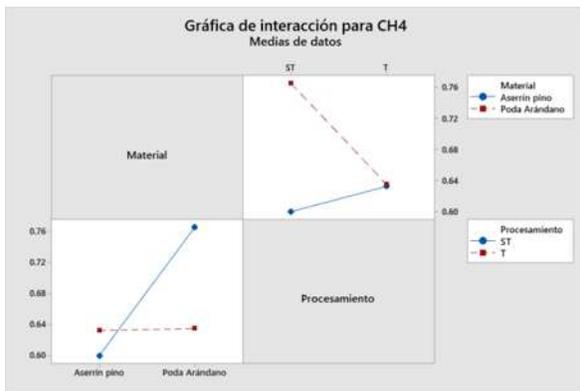
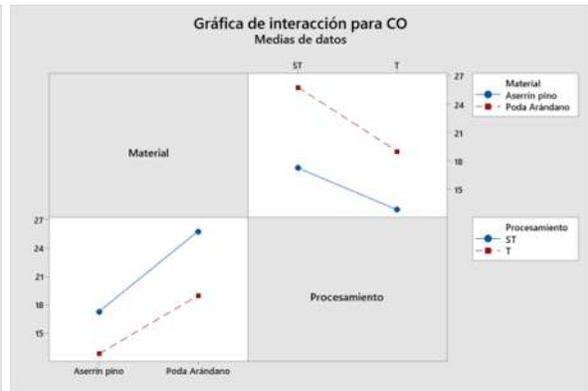
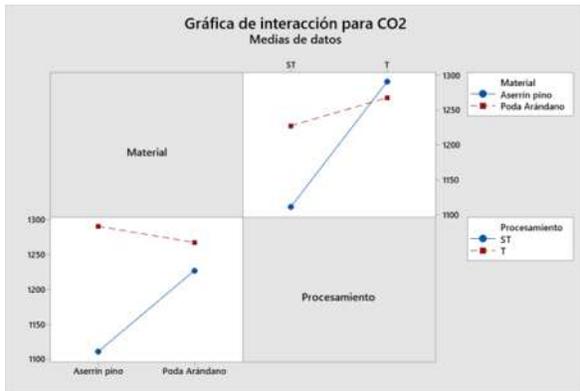
Gráficas de residuos



Gráficas de efectos principales

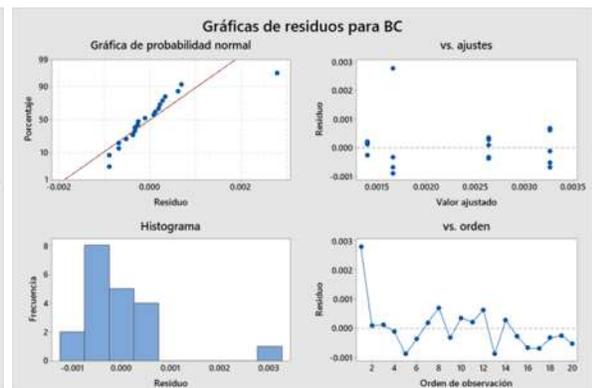
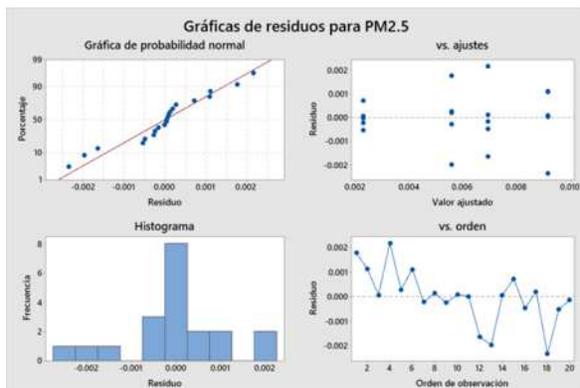
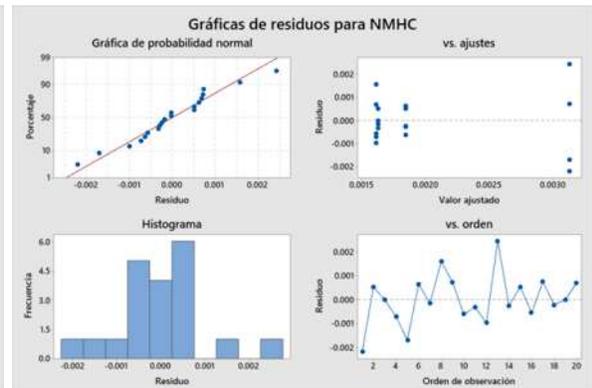
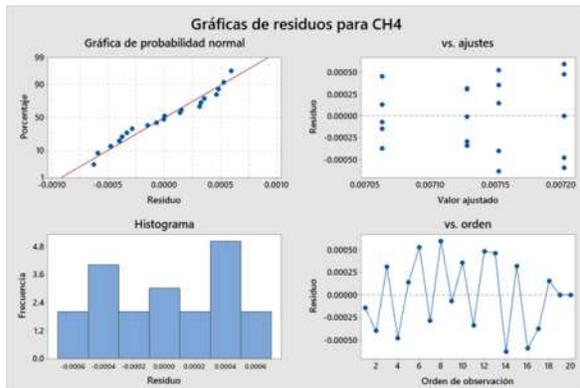
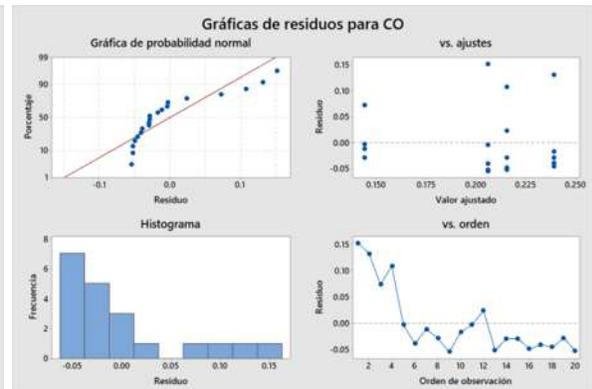
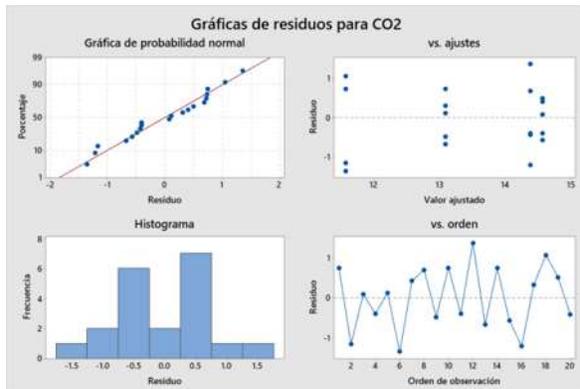


Gráficos de interacción de efectos

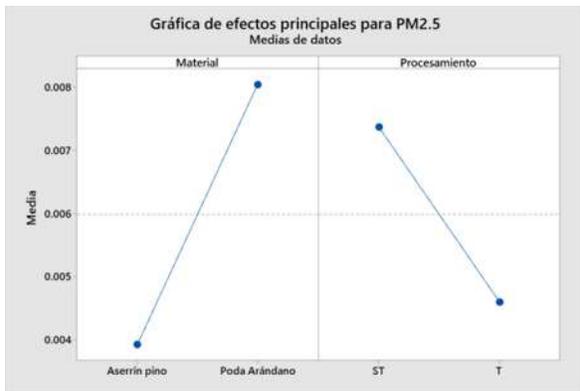
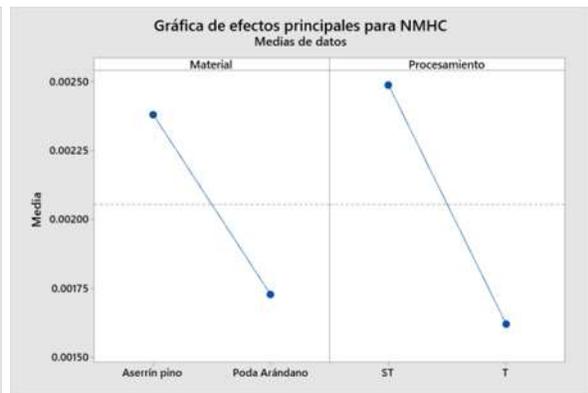
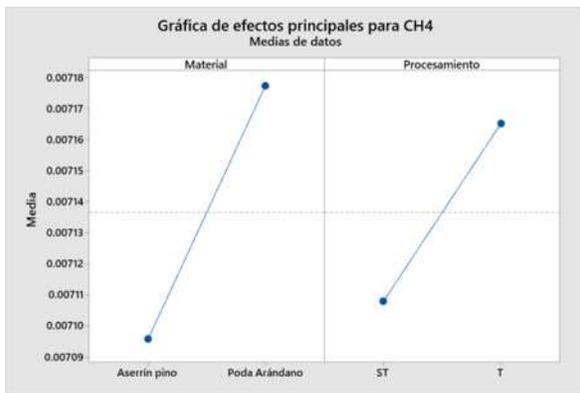
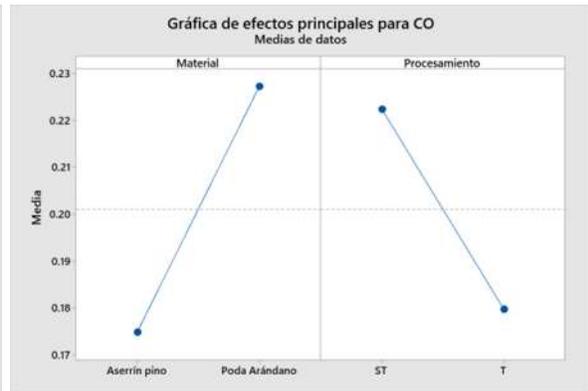
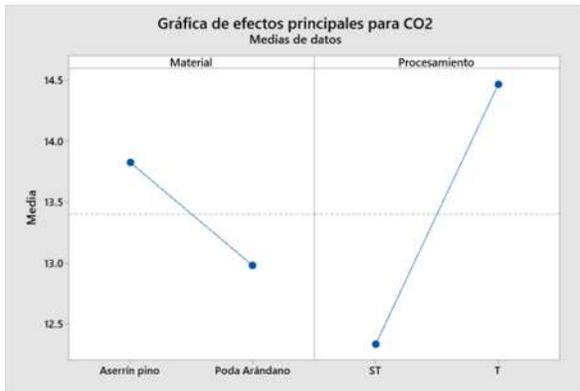


Tasa de emisión

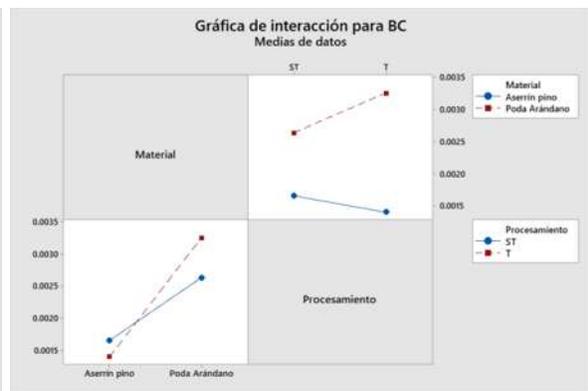
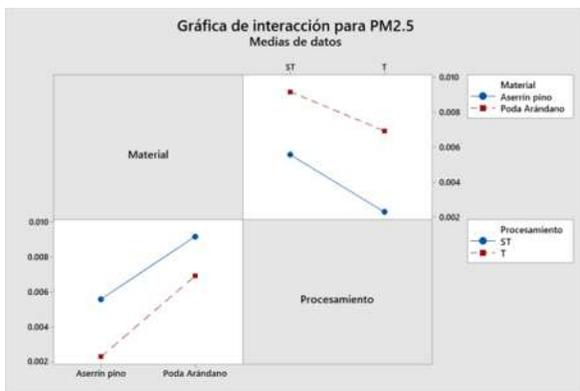
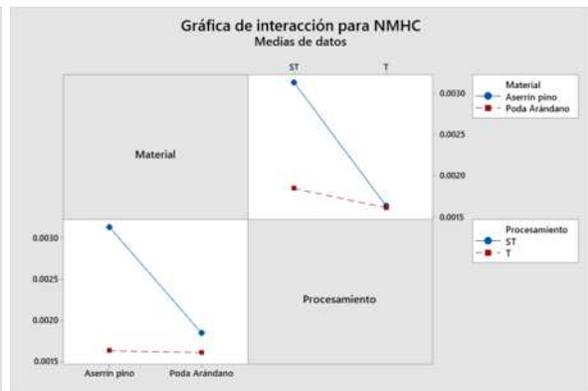
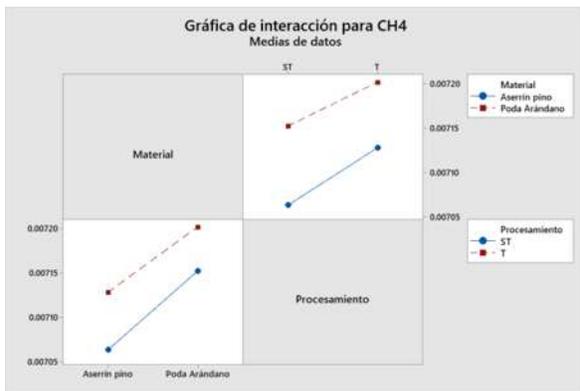
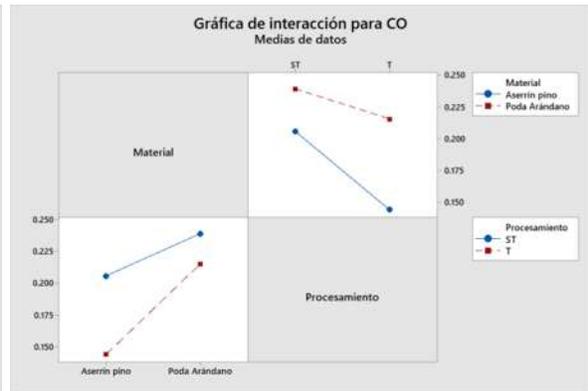
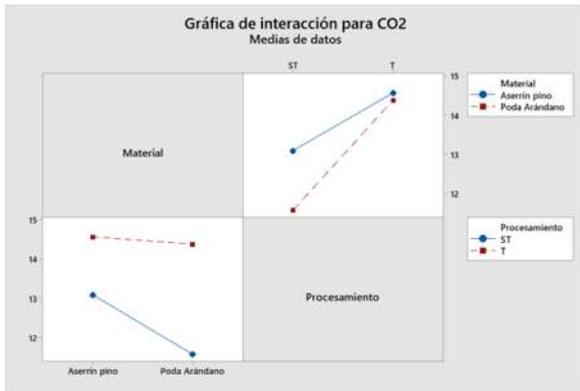
Gráficas de residuos



Gráficas de efectos principales

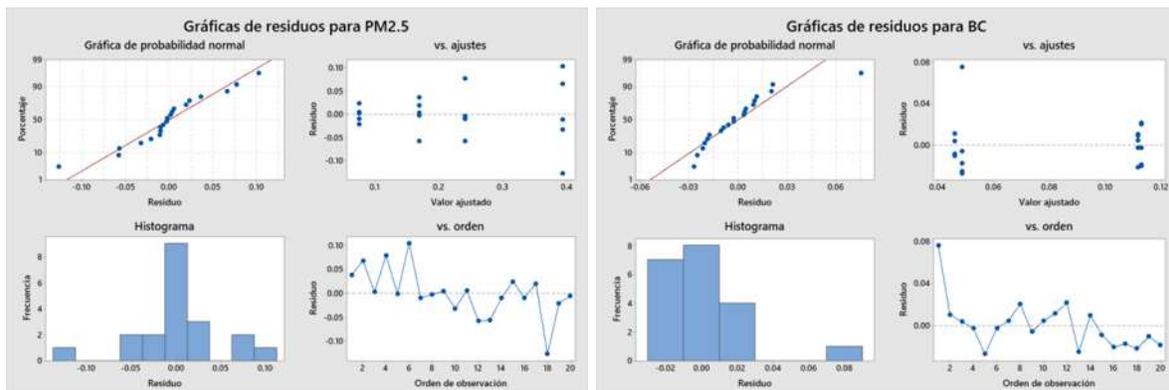
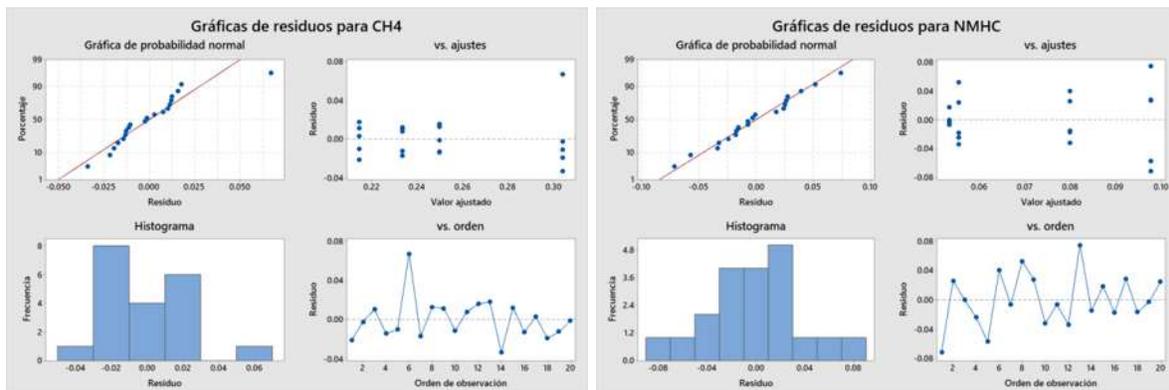
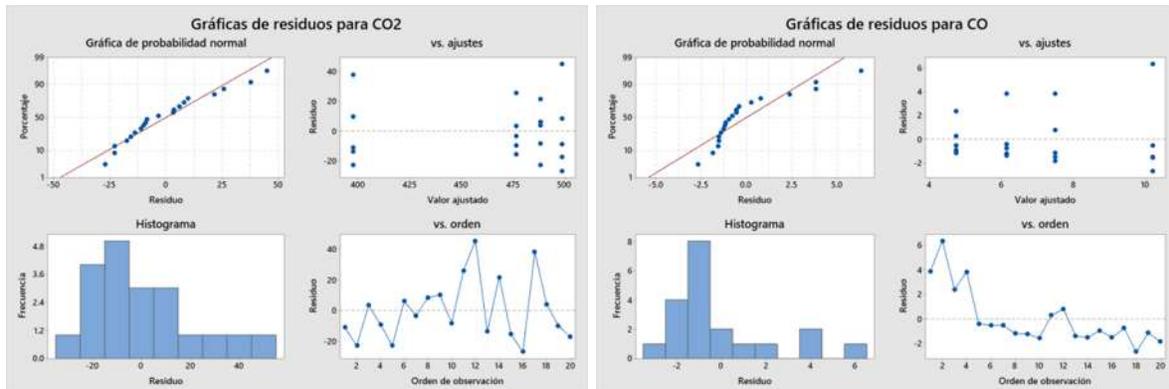


Gráficas de interacción de efectos

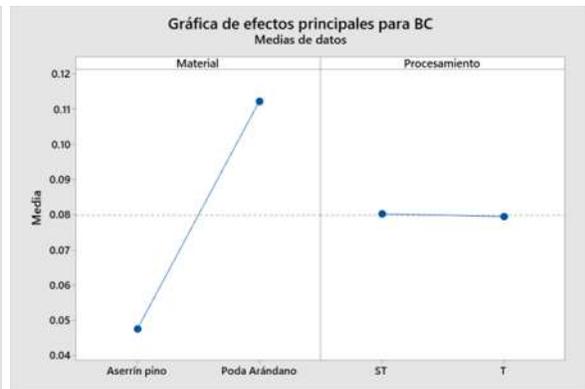
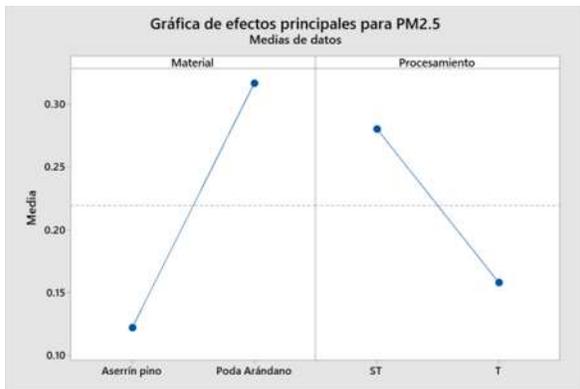
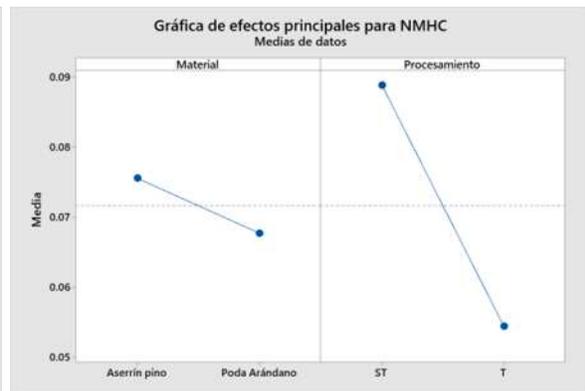
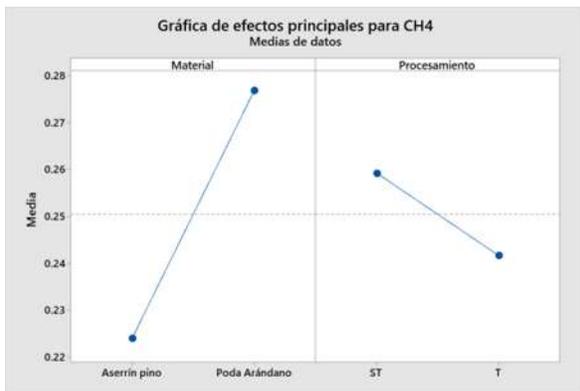
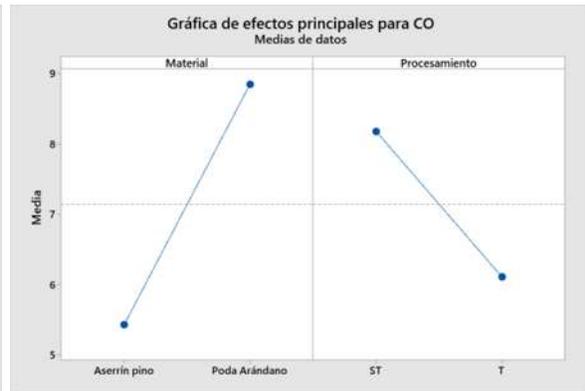
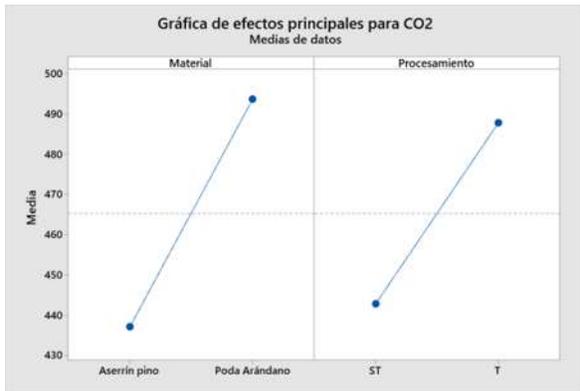


Factores de emisión por energía útil

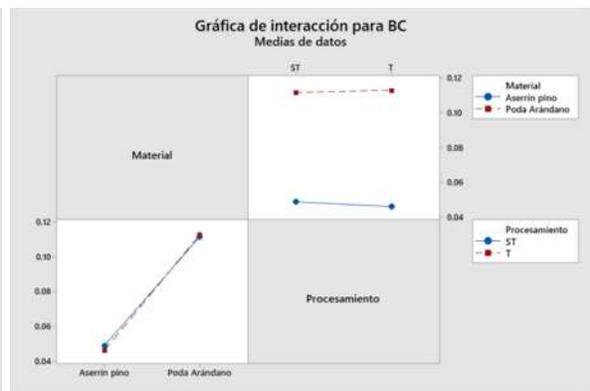
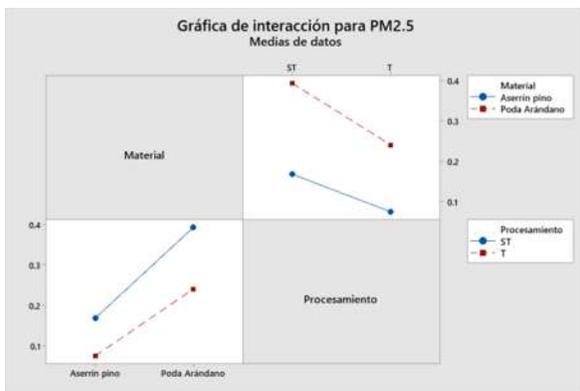
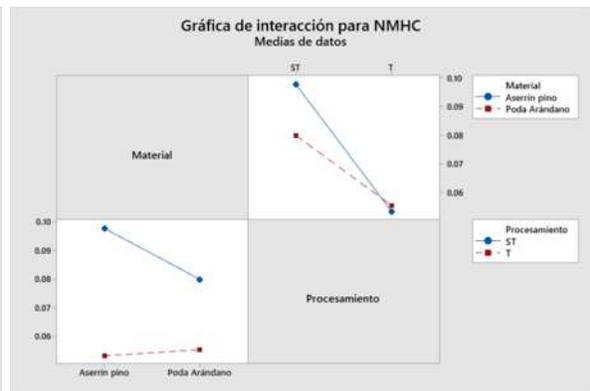
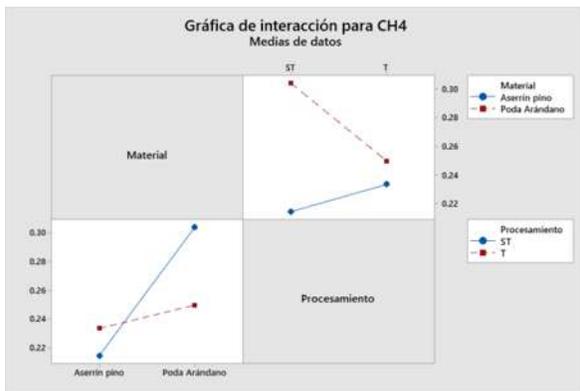
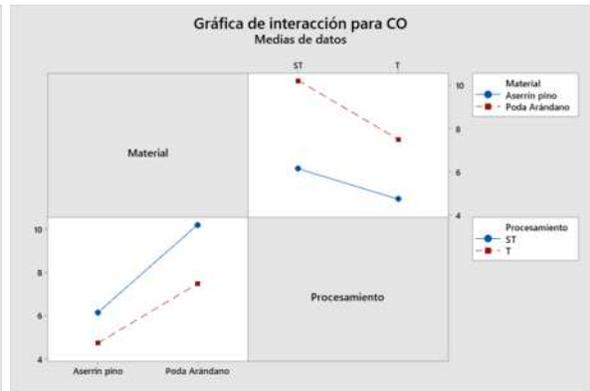
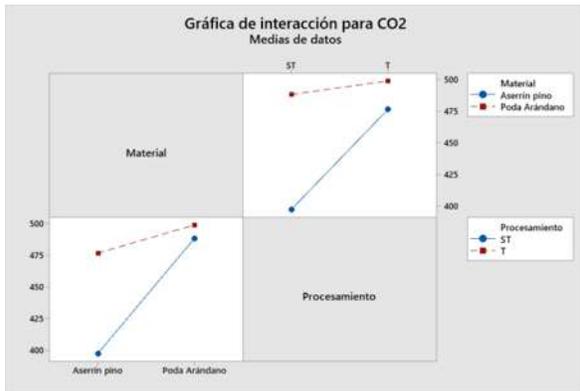
Gráficas de residuos



Gráficas de efectos principales

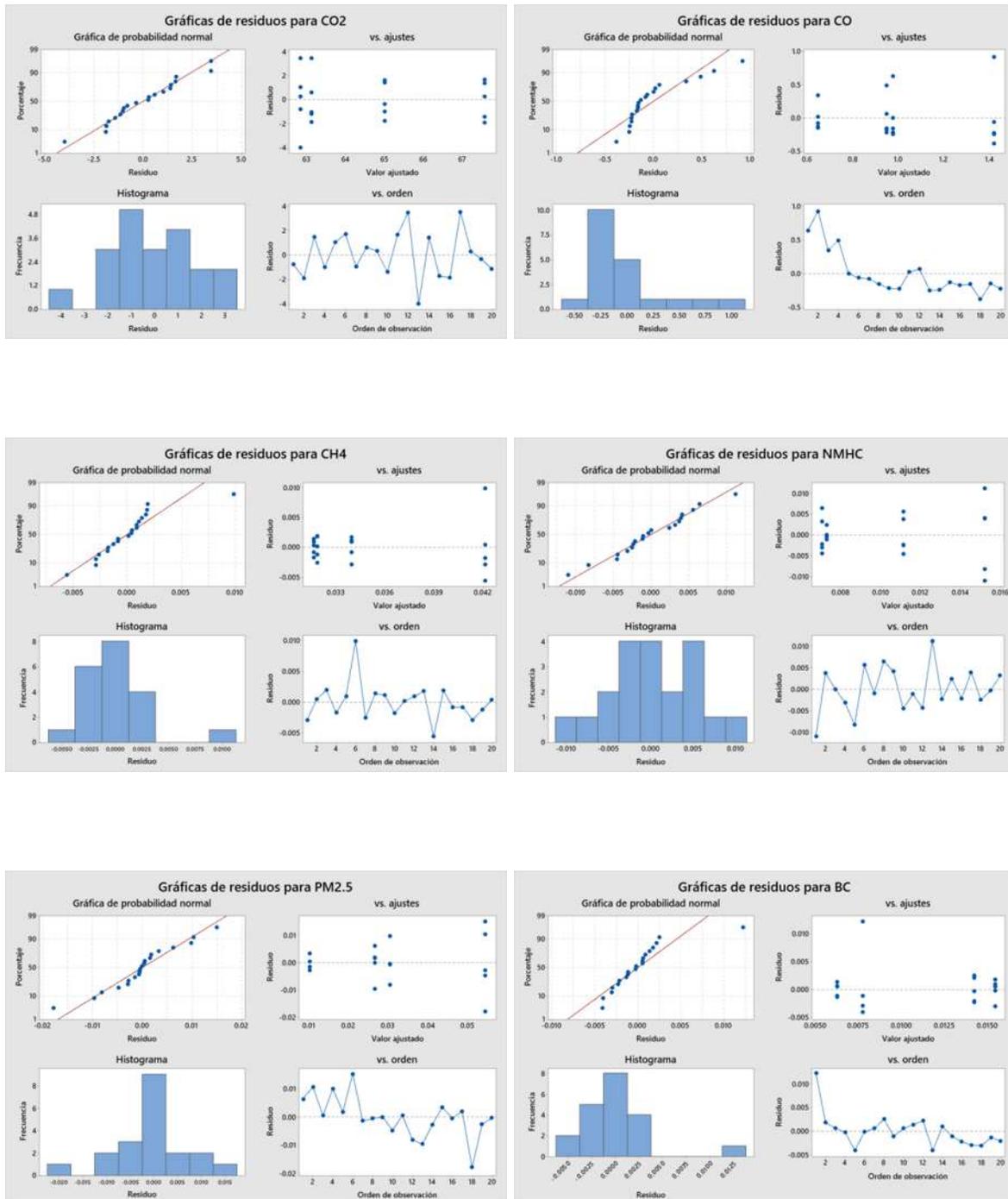


Gráficas de interacción

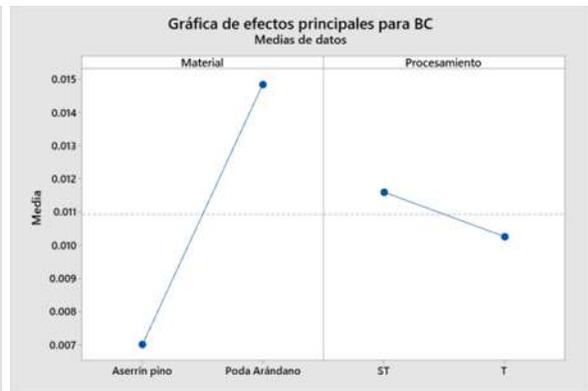
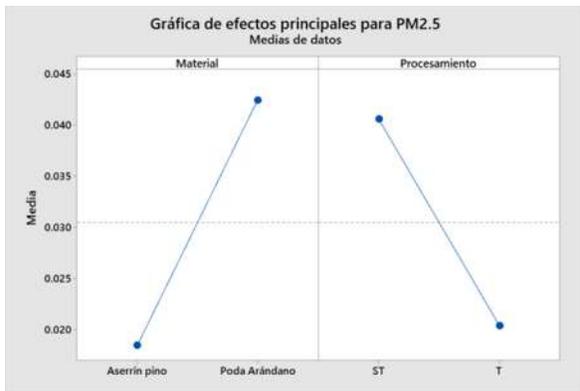
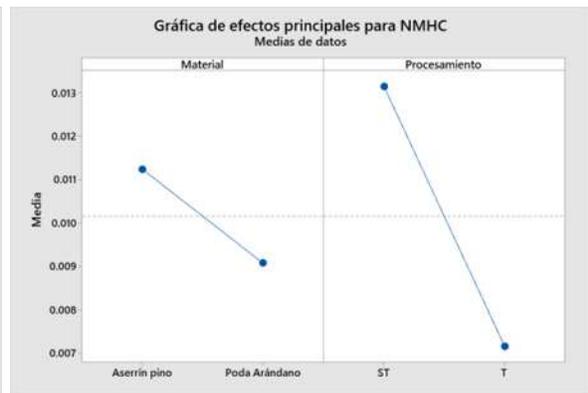
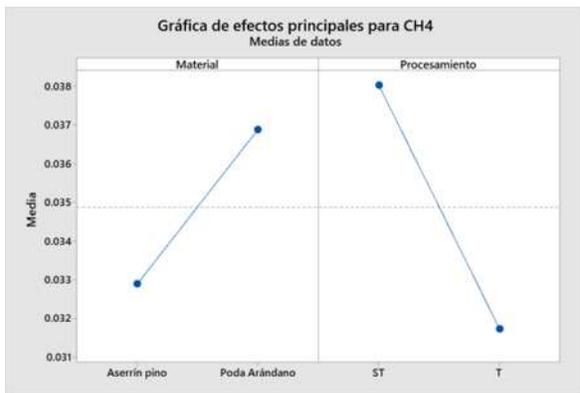
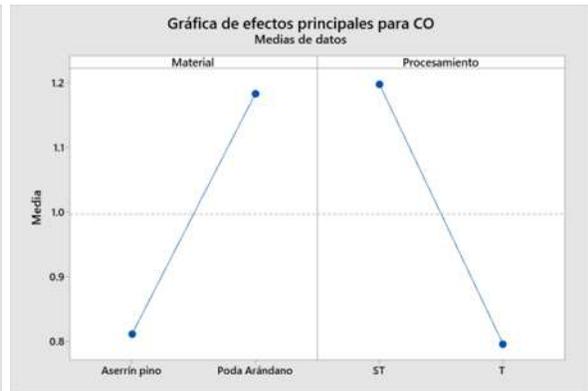
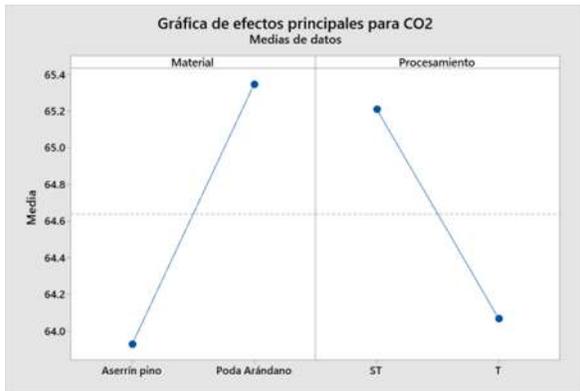


Factores emisión energía disponible o liberada

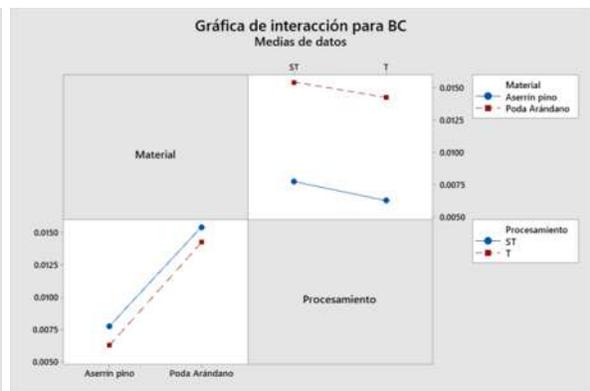
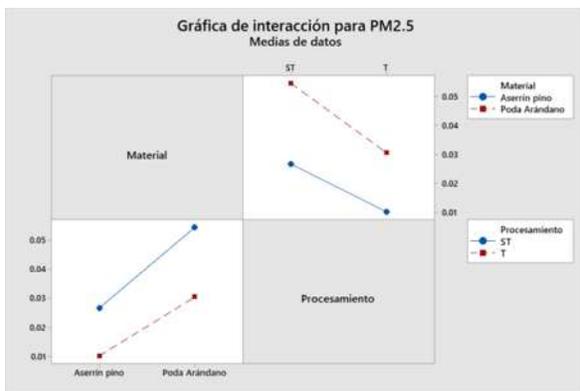
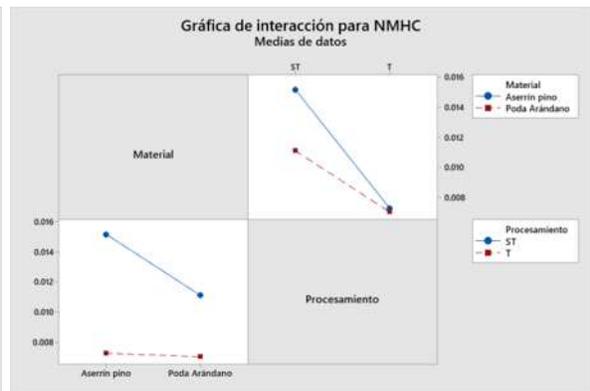
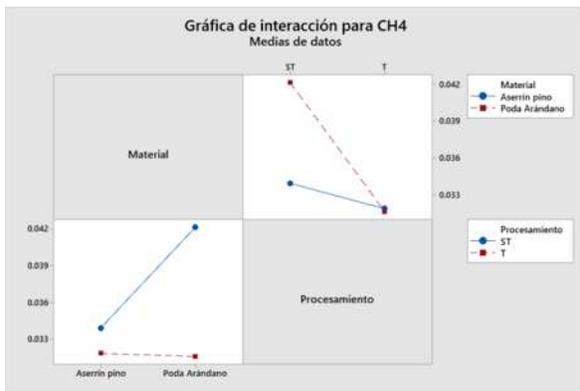
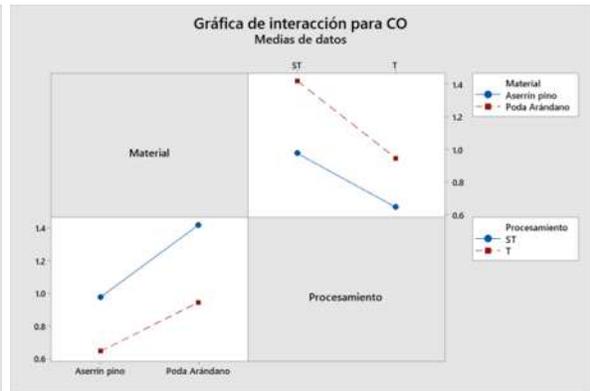
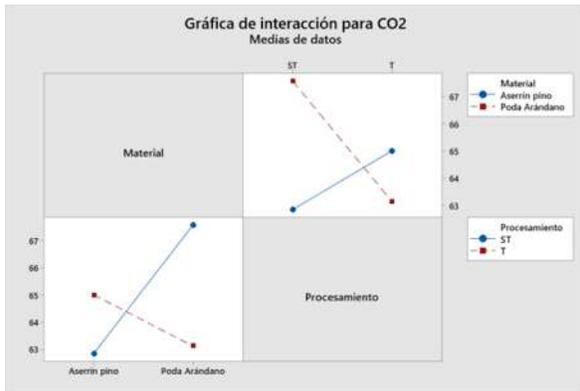
Gráficas de residuos



Gráficos de efectos principales

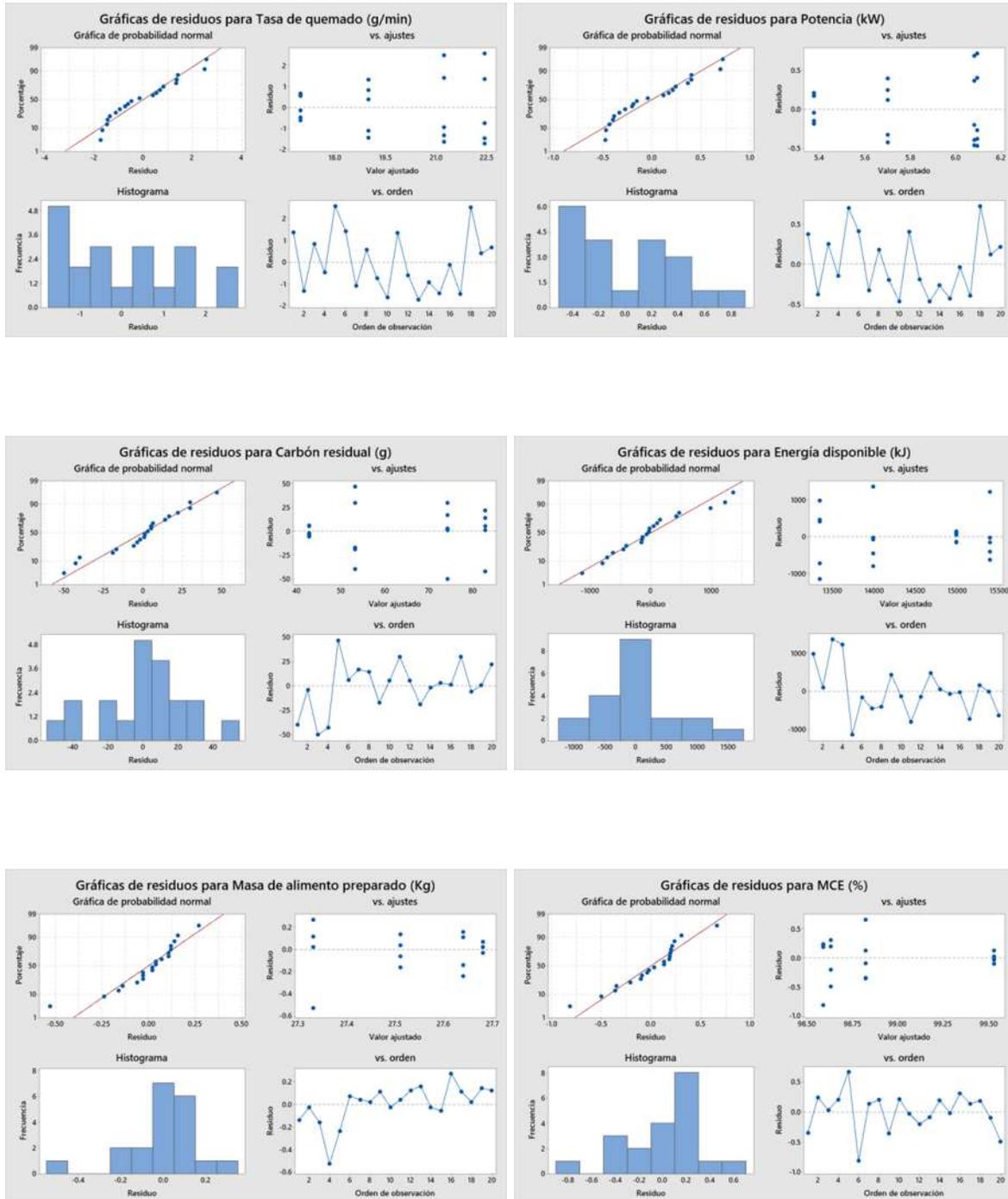


Gráfica de interacciones de efectos

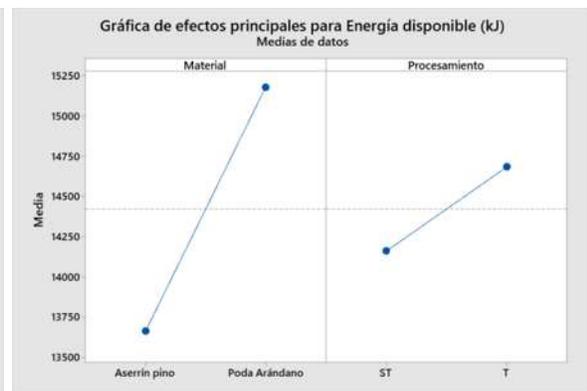
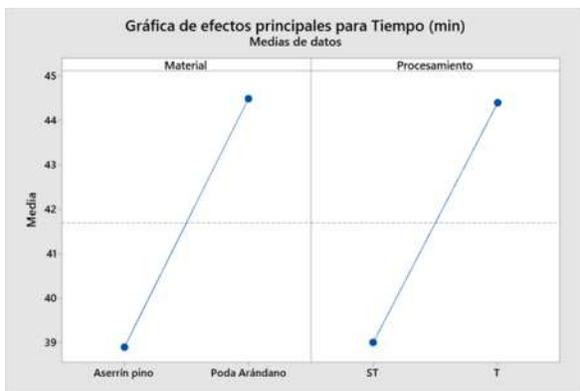
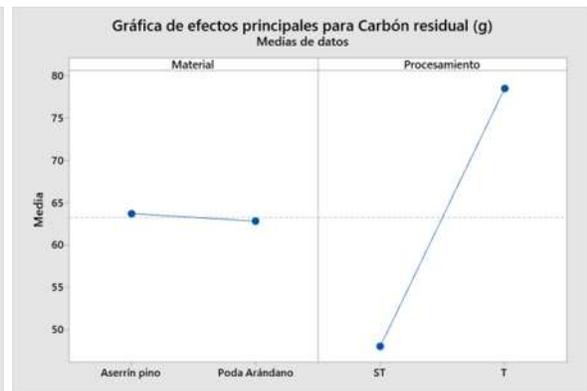
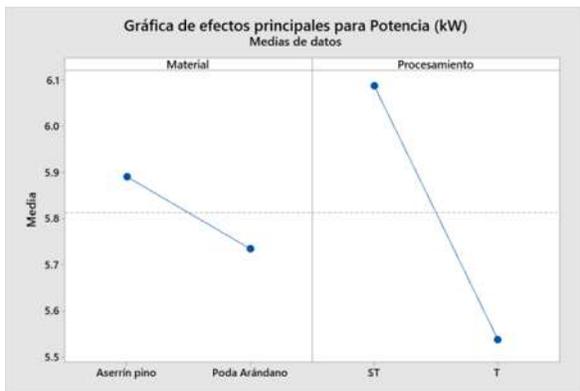
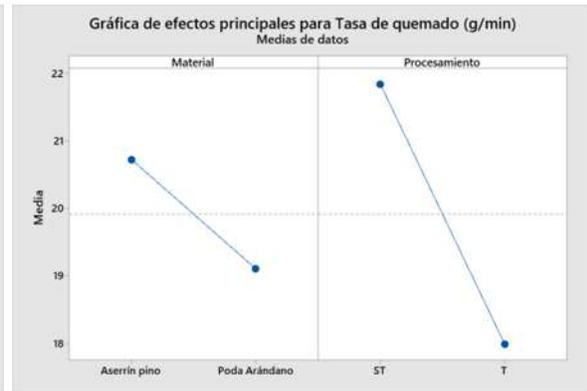
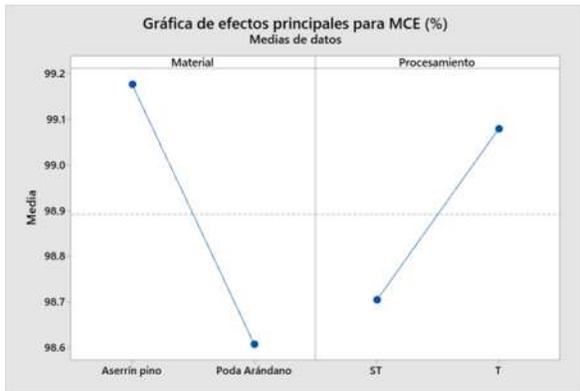


Pruebas CCT

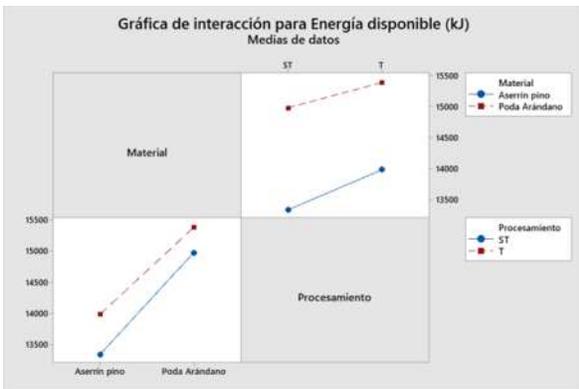
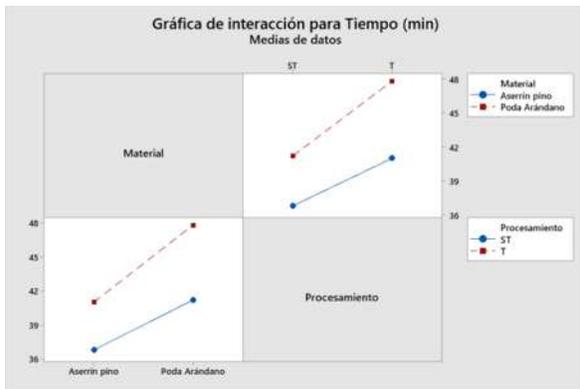
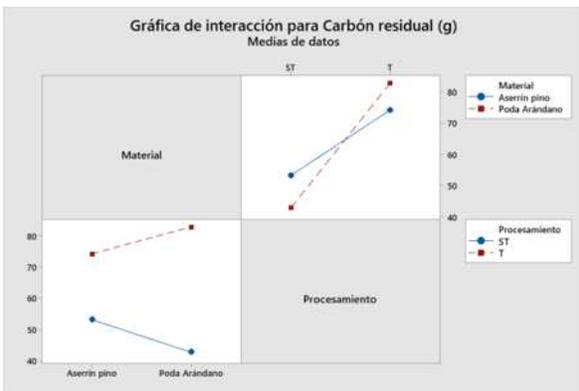
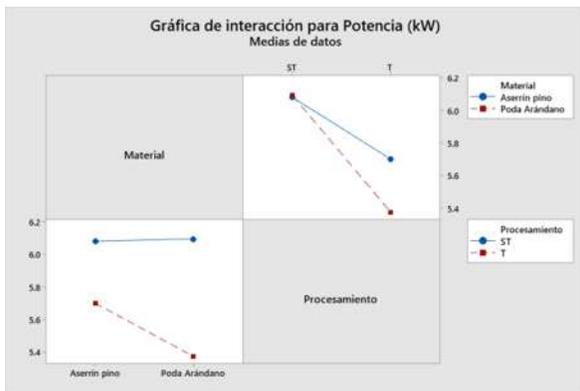
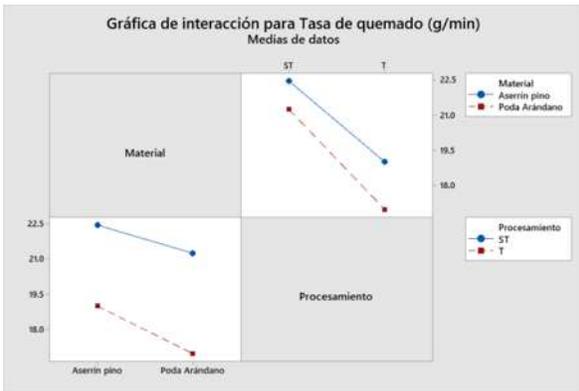
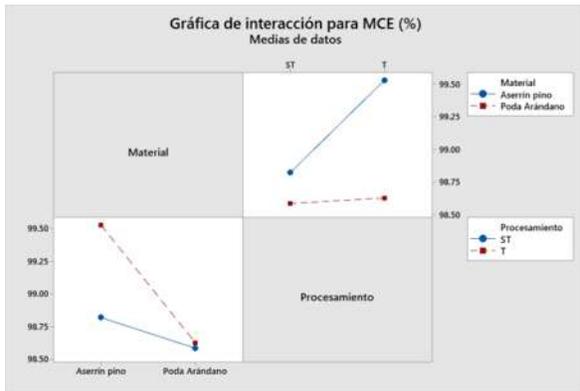
Desempeño energético



Gráficas de efectos principales

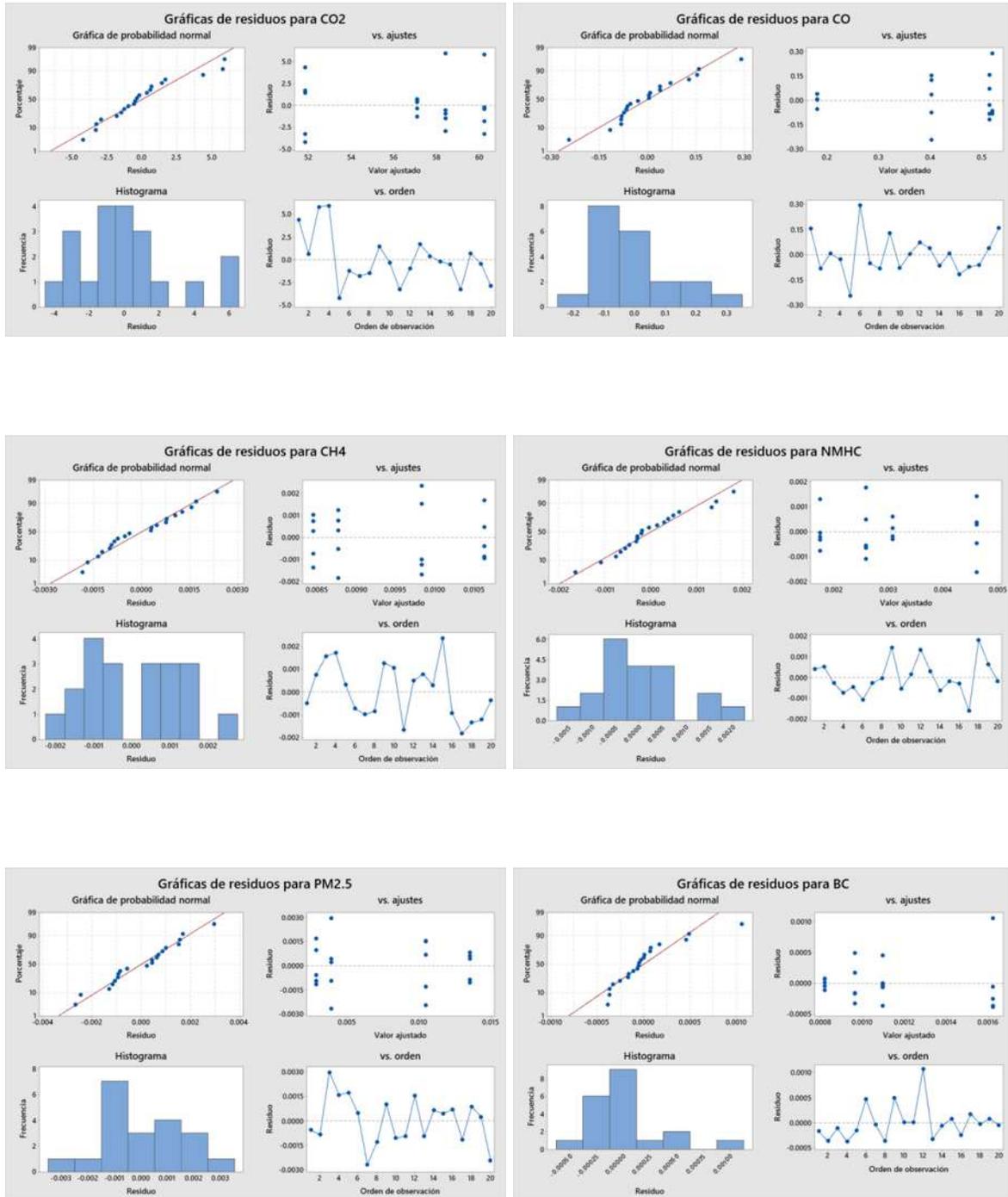


Gráficas de interacción de efectos

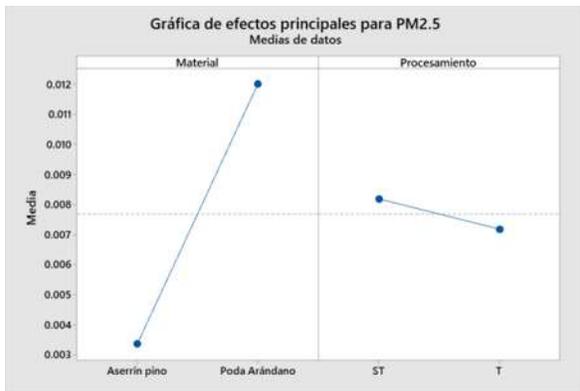
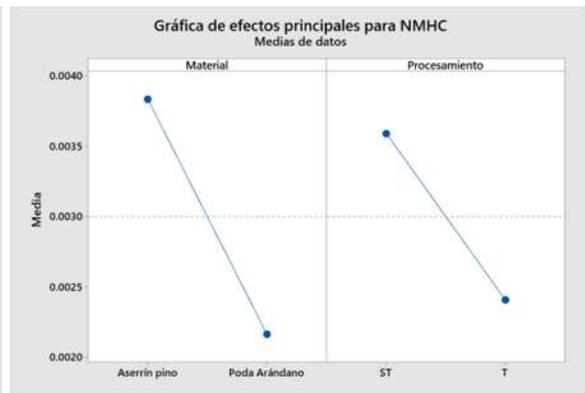
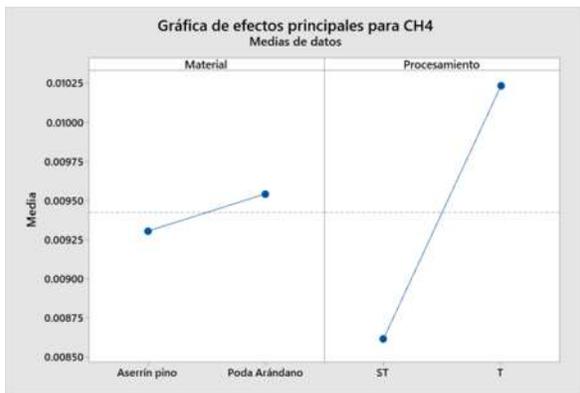
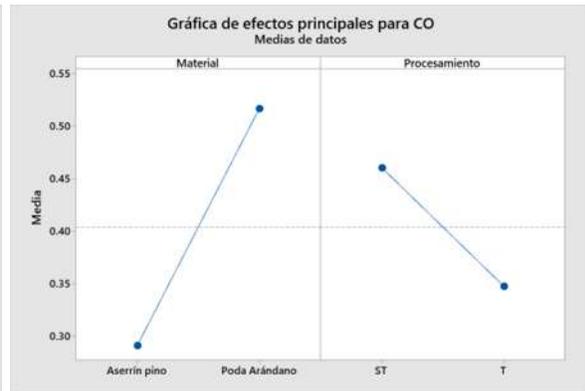
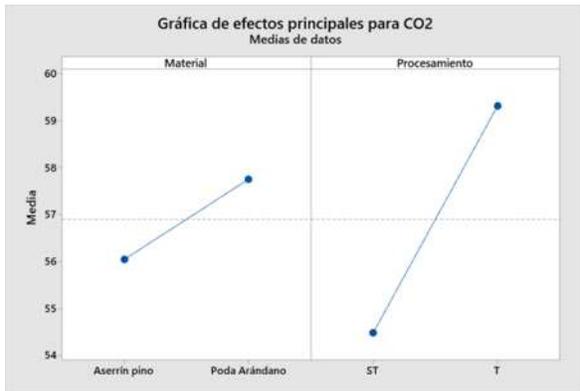


Factores de emisión por masa de alimento

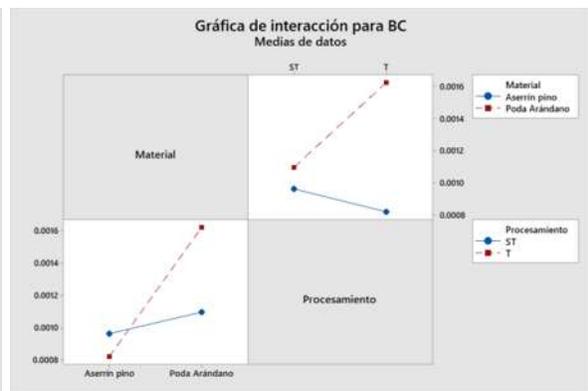
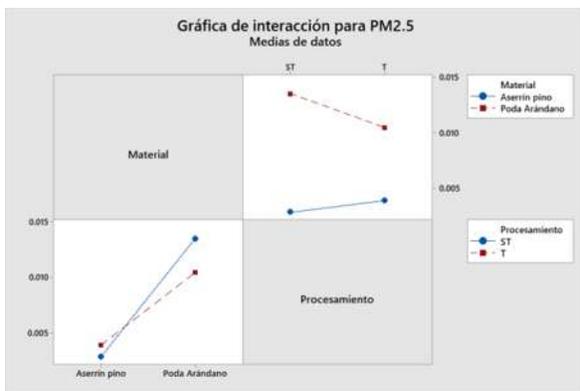
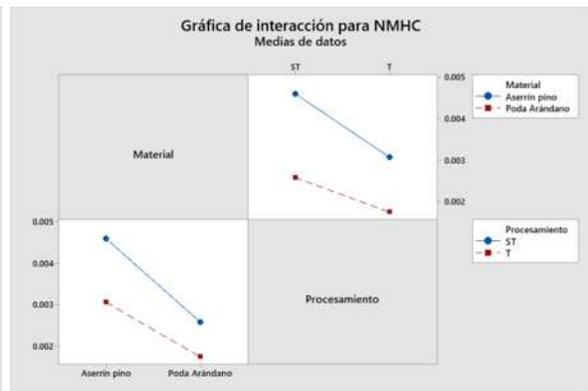
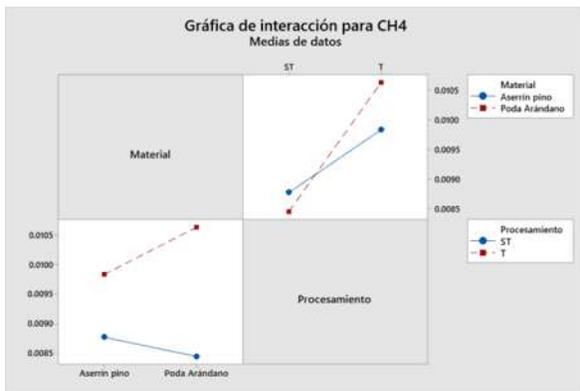
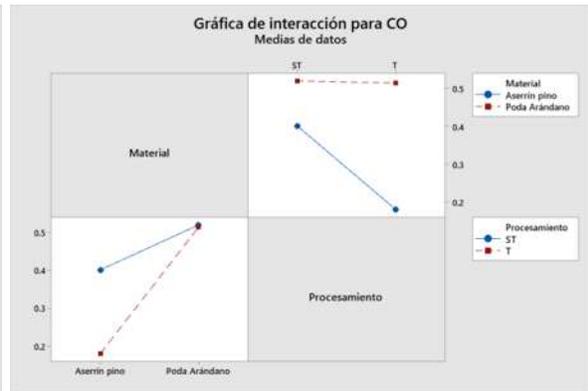
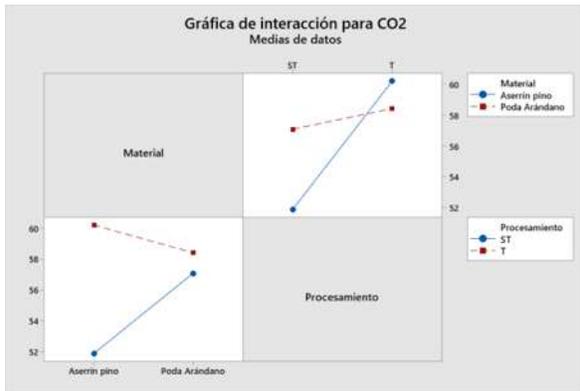
Gráficas de residuos



Gráfica de efectos principales

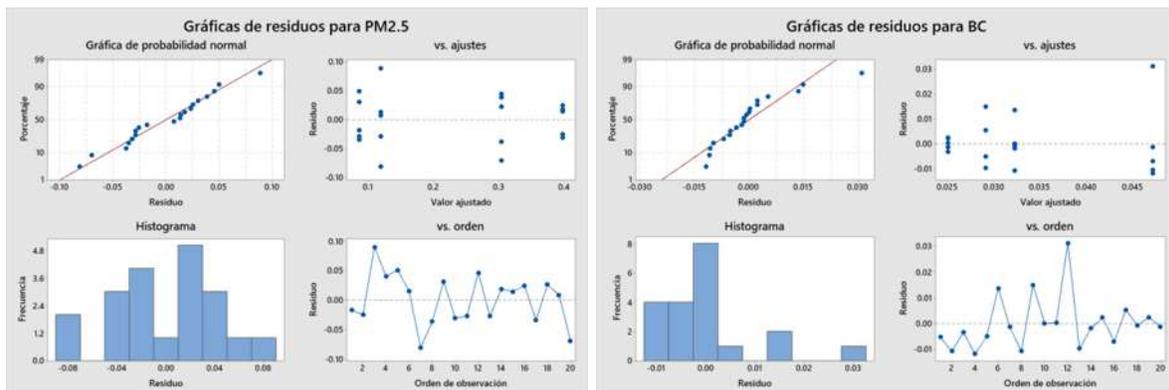
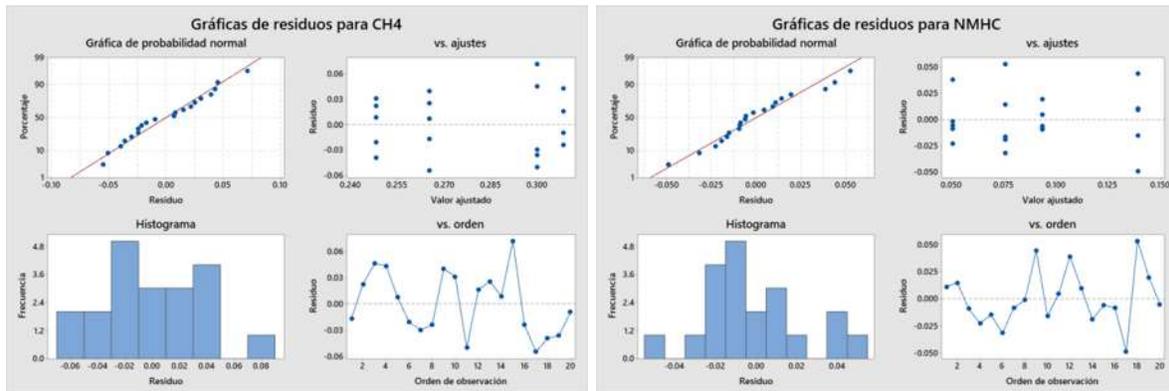
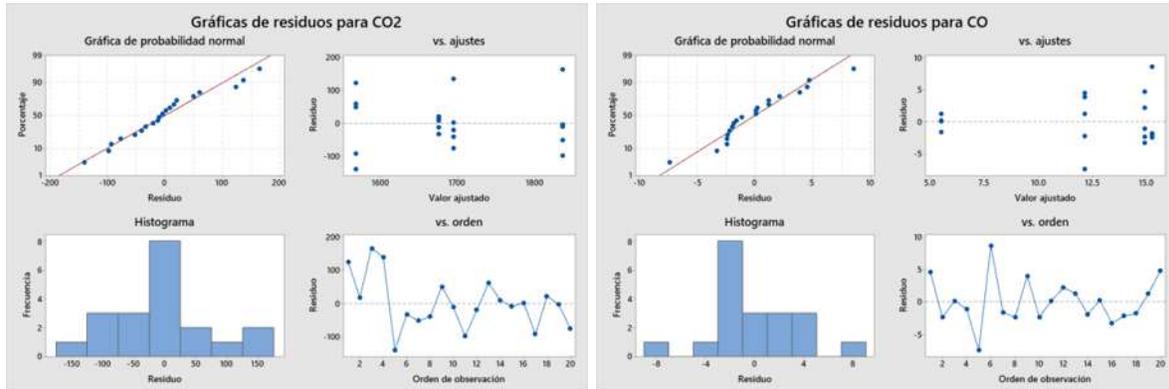


Gráficas de interacción de efectos

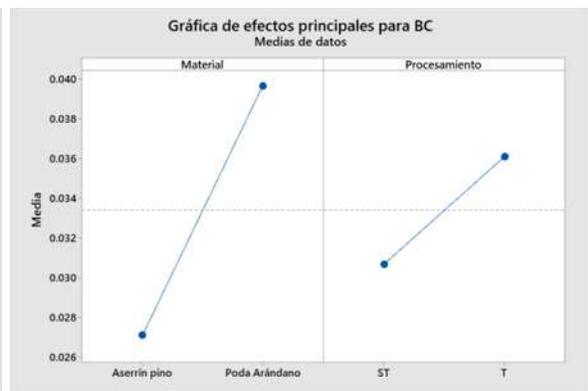
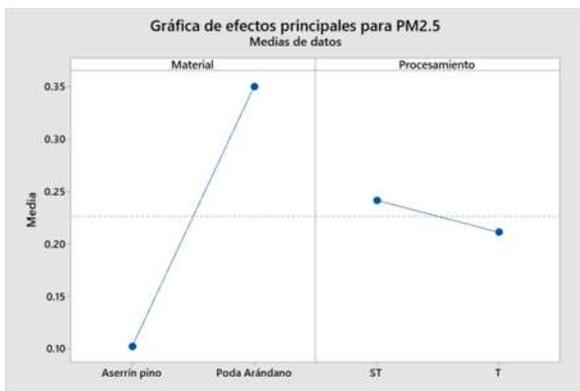
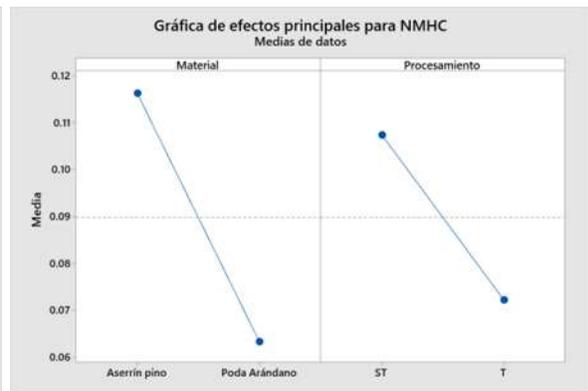
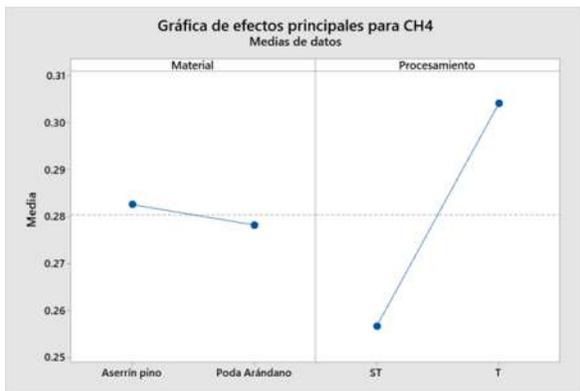
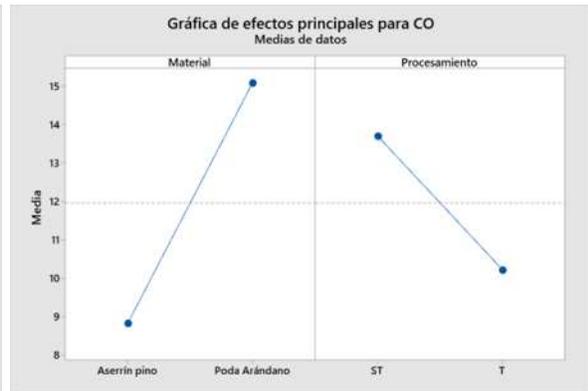
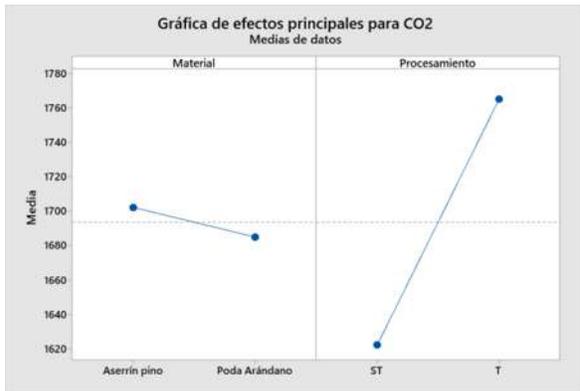


Factores de emisión por combustible seco

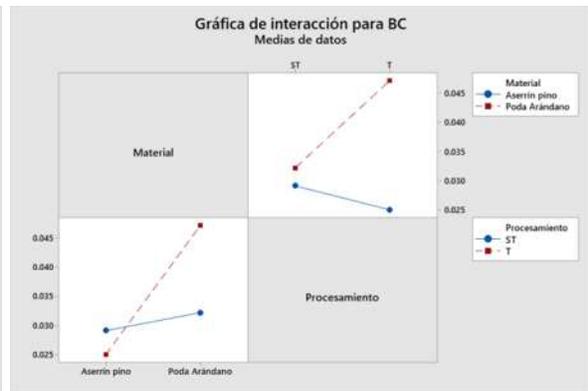
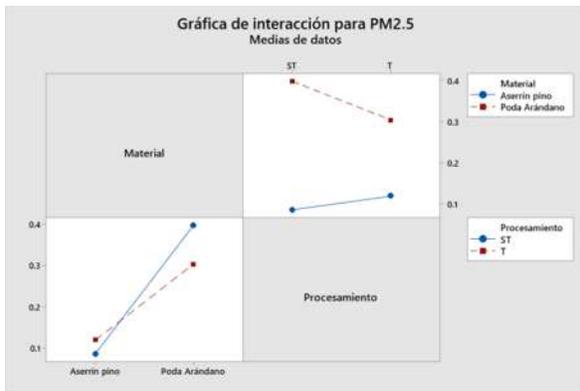
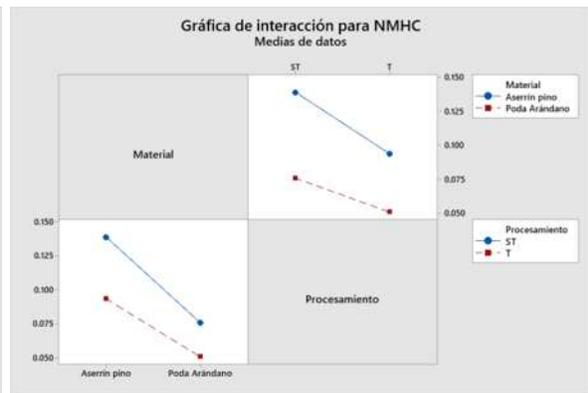
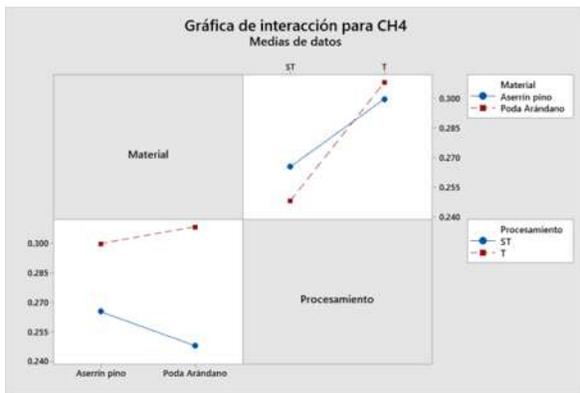
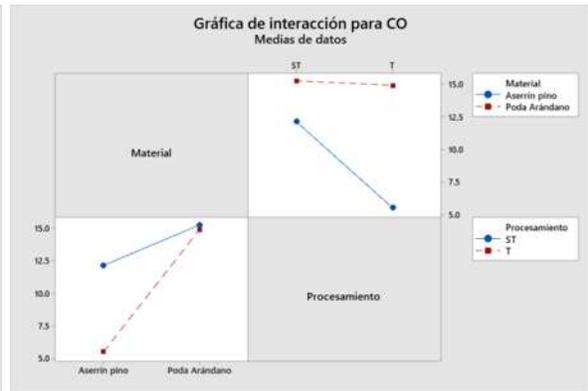
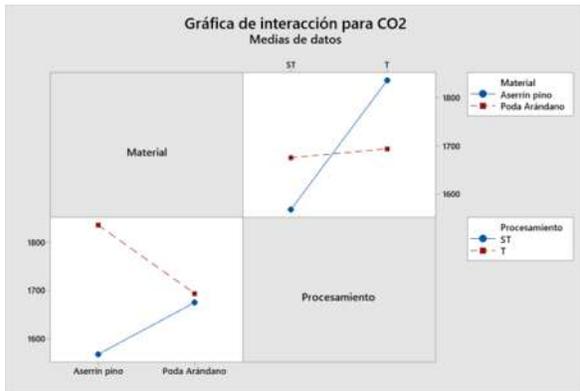
Gráficas de residuos



Gráficas de efectos principales

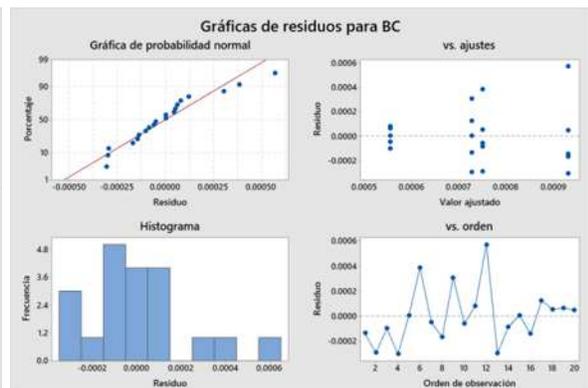
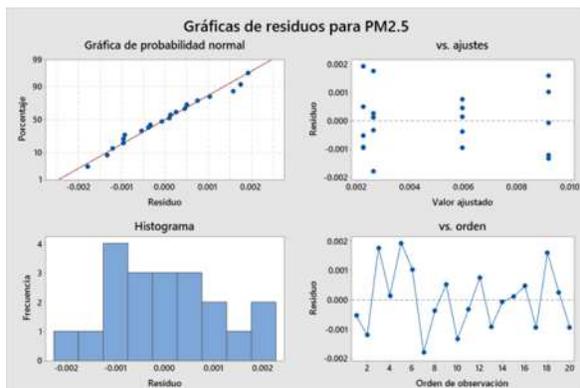
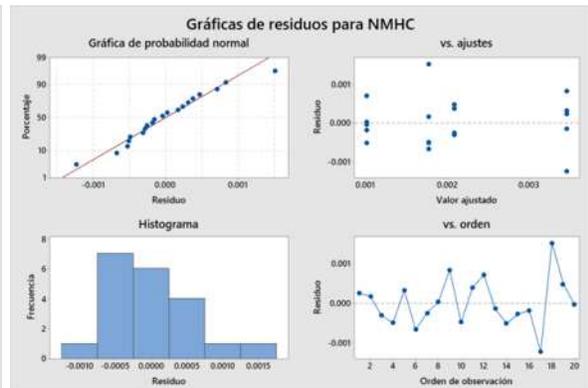
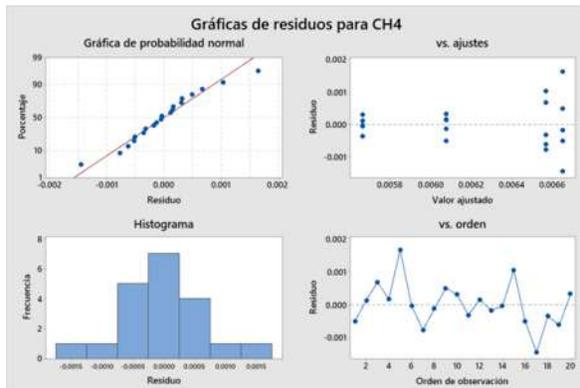
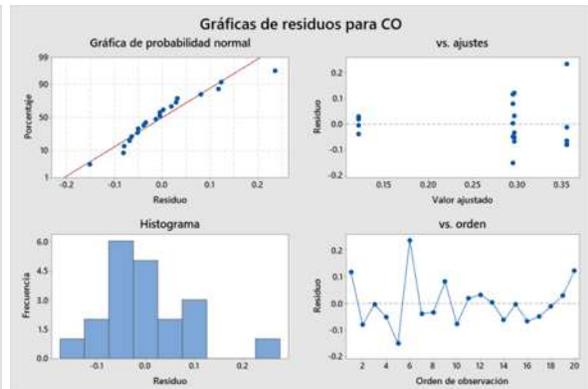
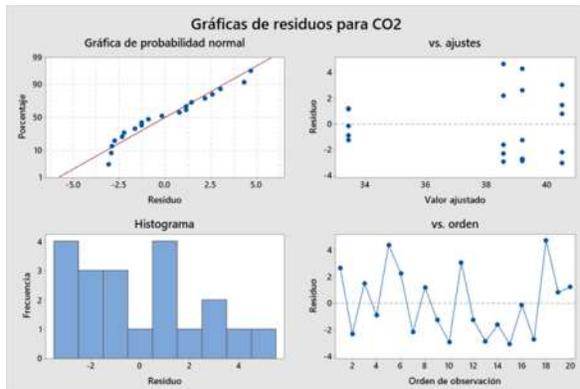


Gráficas de interacción de efectos

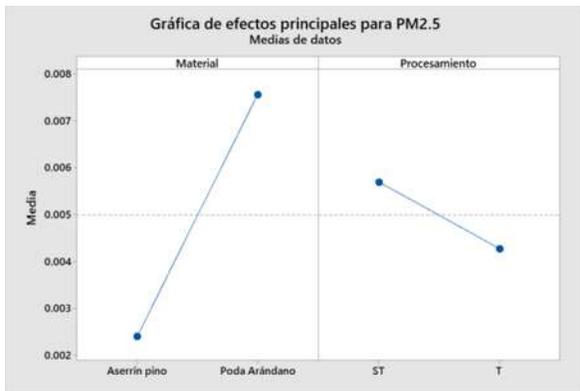
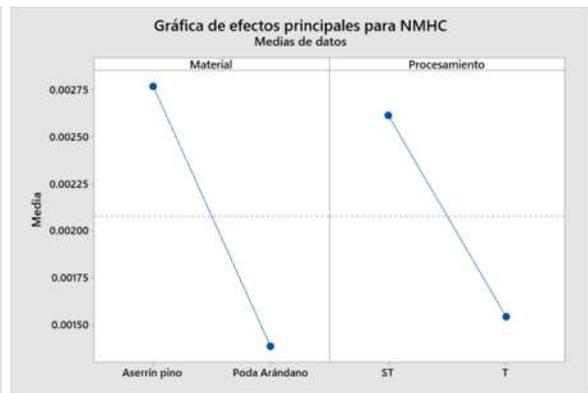
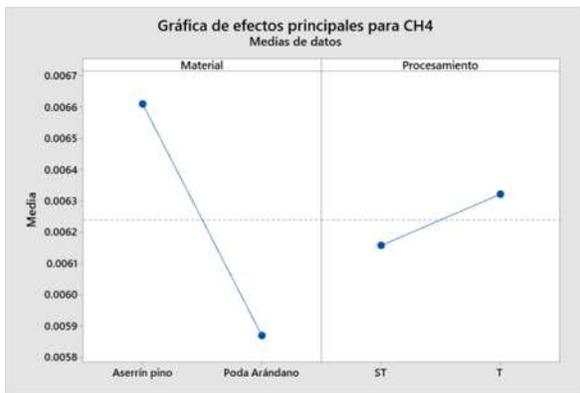
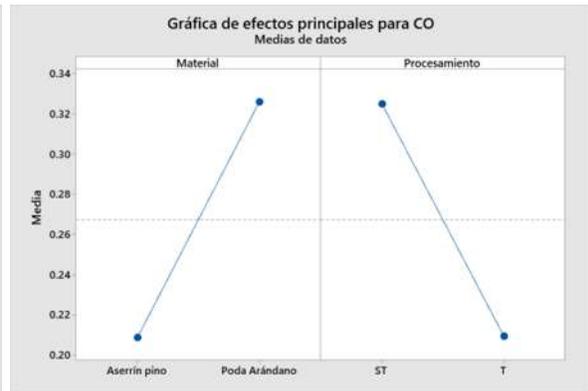
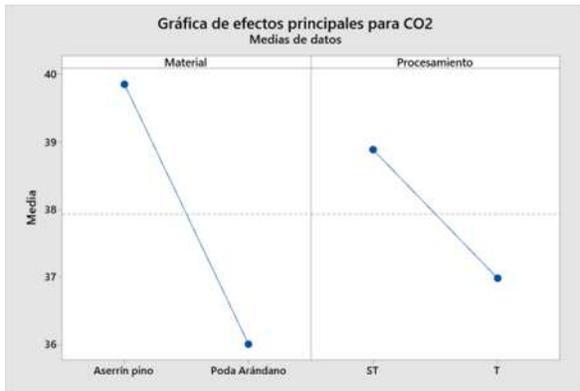


Tasa de emisión

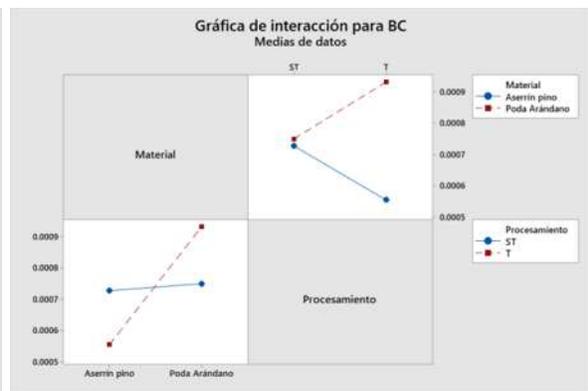
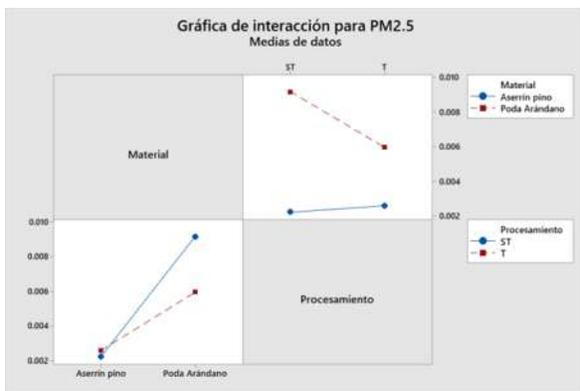
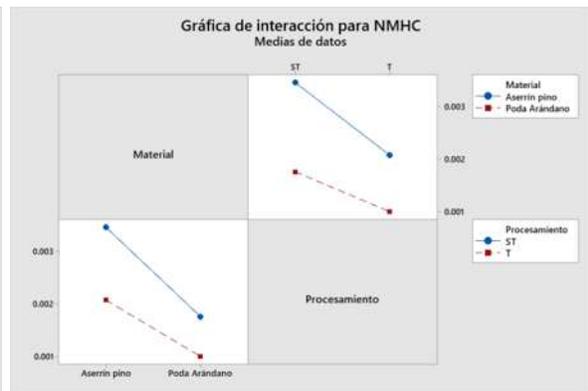
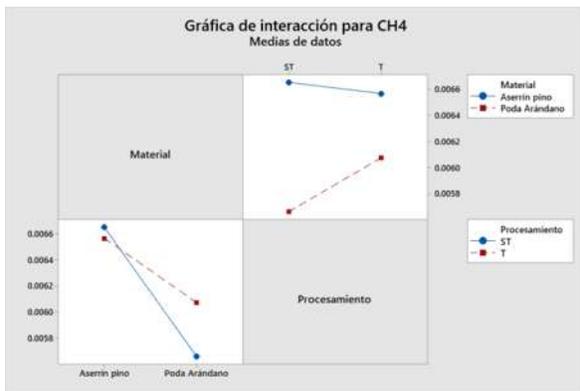
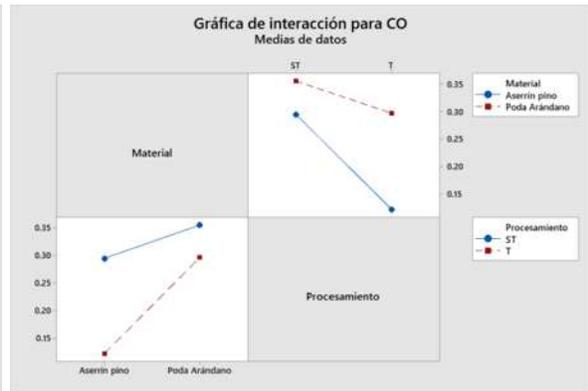
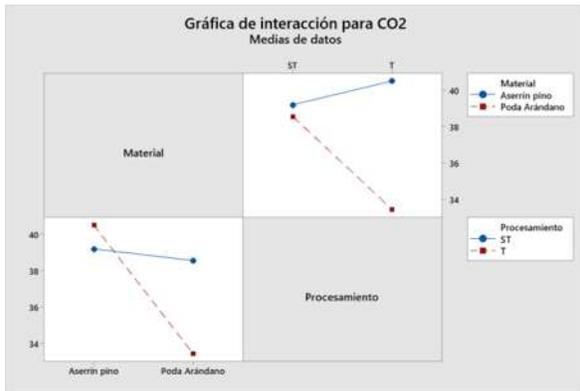
Gráficas de residuos



Gráficas de efectos principales

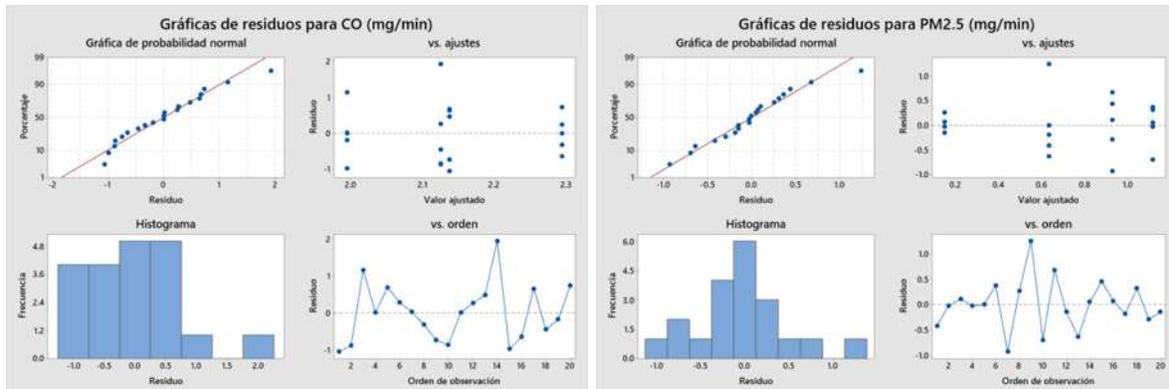


Gráfica de interacción de efectos

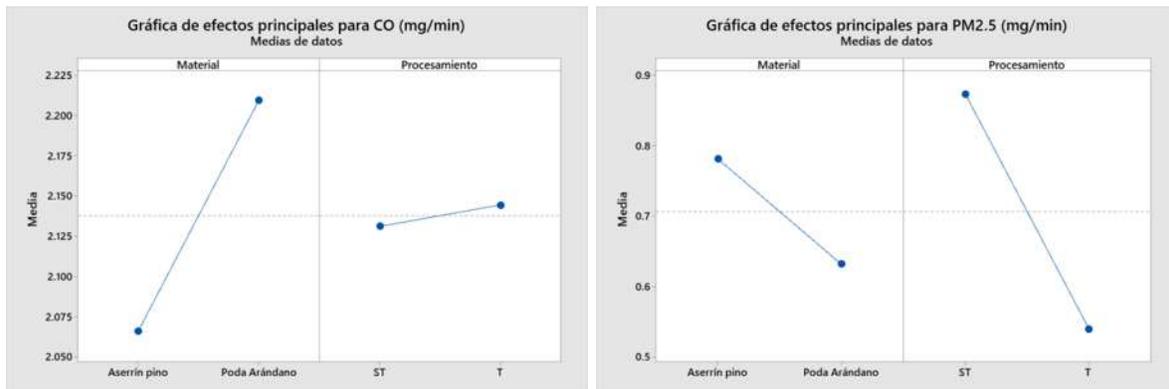


Tasa de emisiones fugitivas

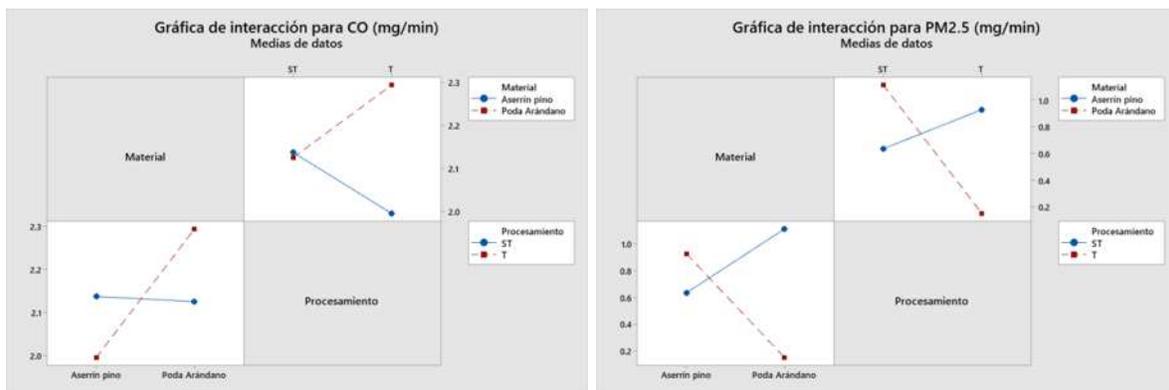
Gráficas de residuos



Gráficas de efectos principales



Gráfica de interacción de efectos

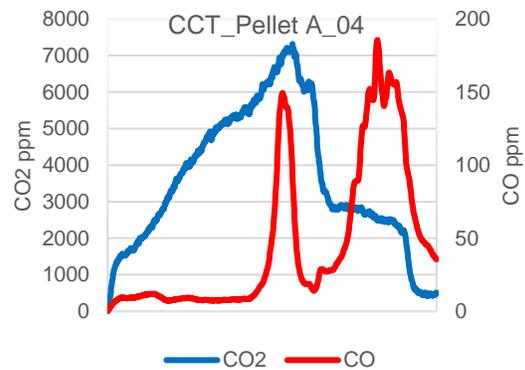
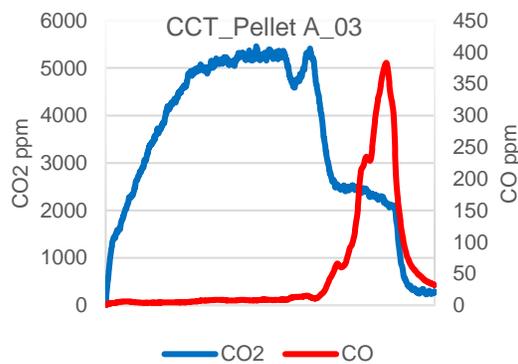
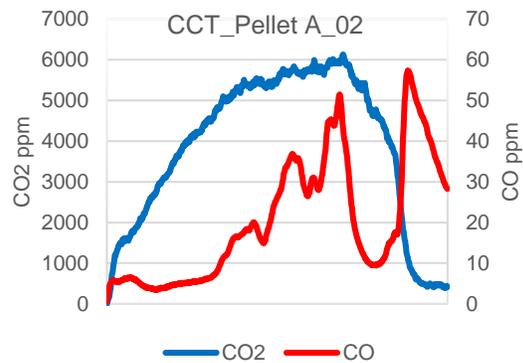
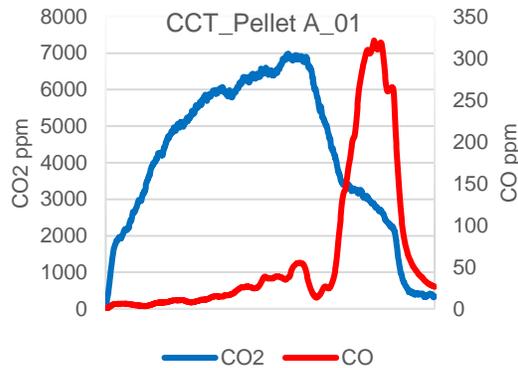


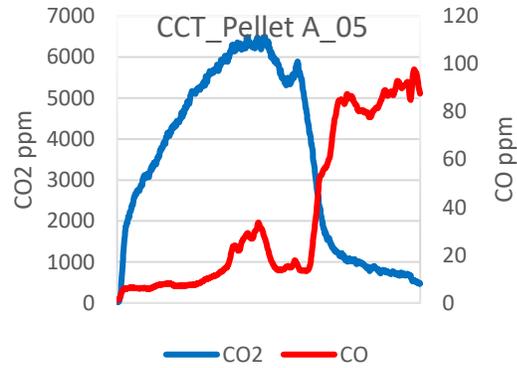
APÉNDICE C

Emisiones de CO y CO₂ en el uso de los pellets

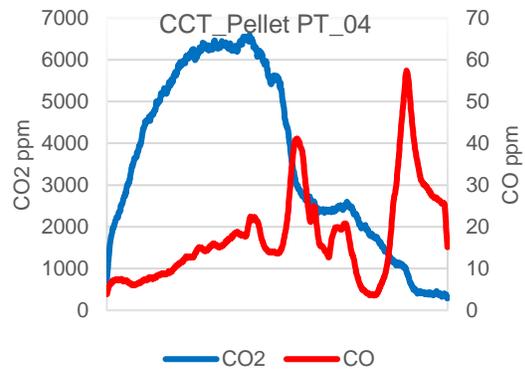
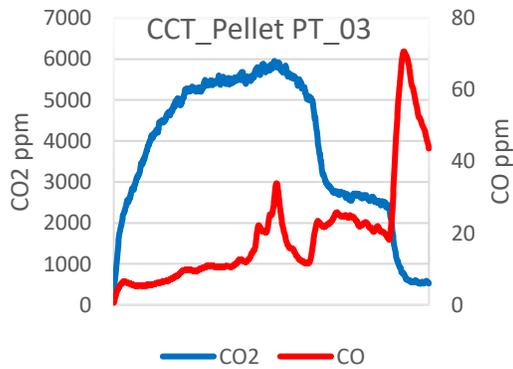
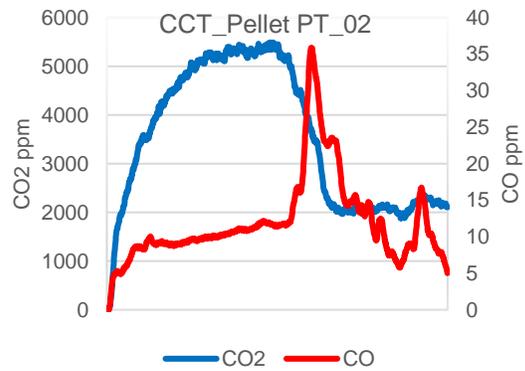
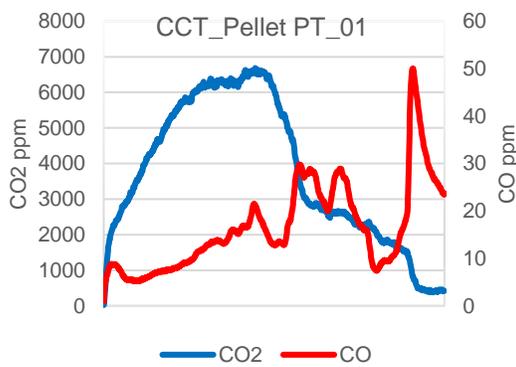
Pruebas CCT

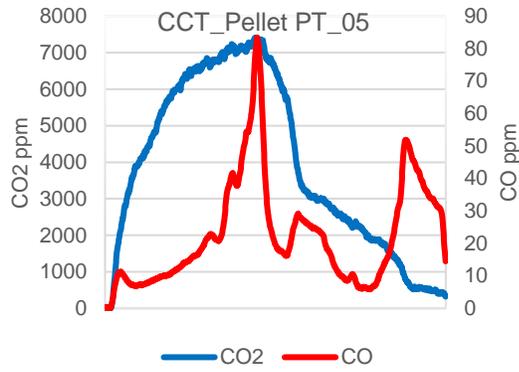
Pellets de Aserrín de pino (A)



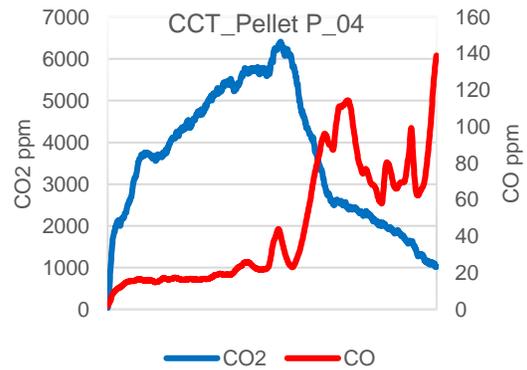
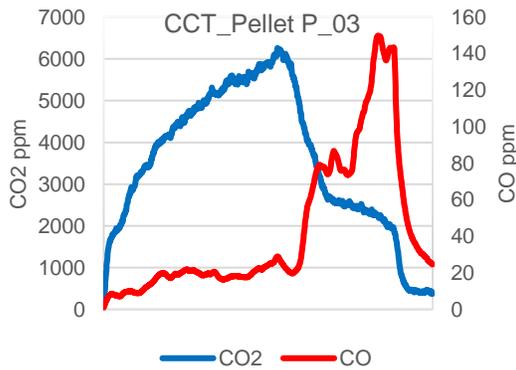
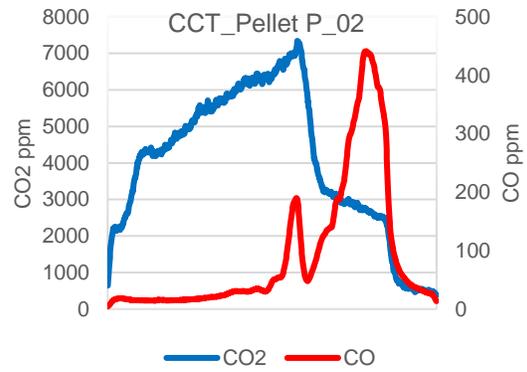
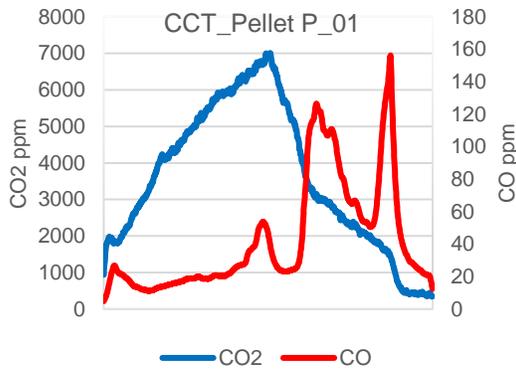


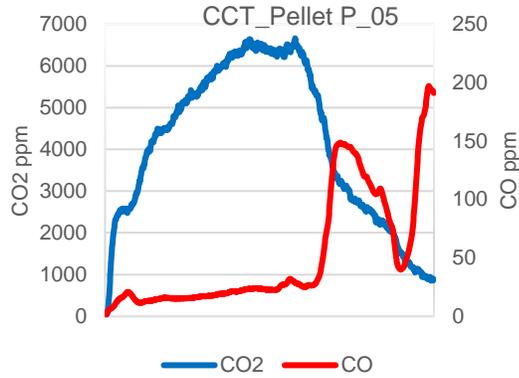
Pellets Aserrín de pino+Aserrín de pino Torrefactado (PT)



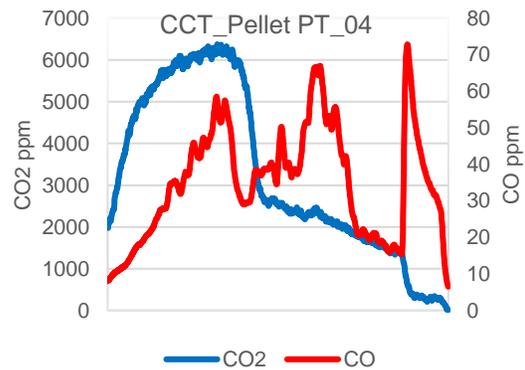
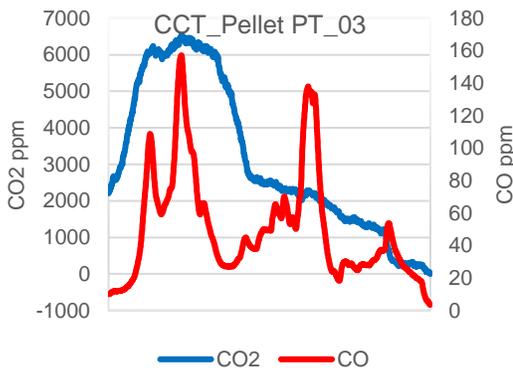
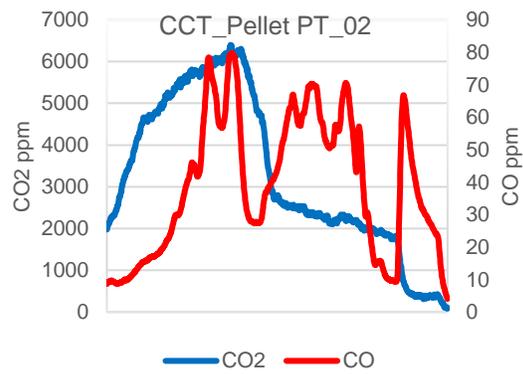
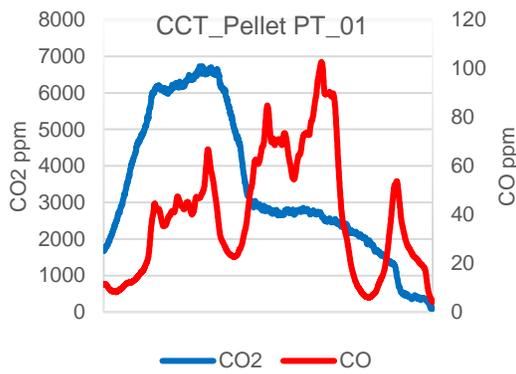


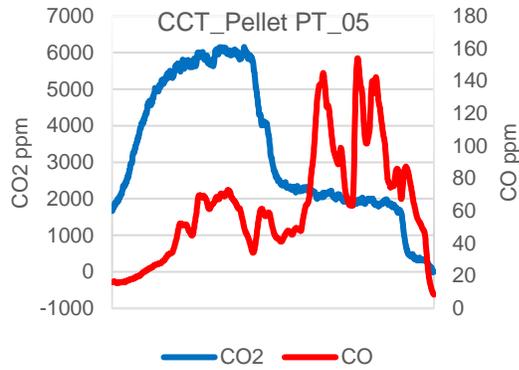
Pellets de Poda de Arándano (P)





Pellets Poda de Arándano+ Poda de Arándano Torrefactada (PT)

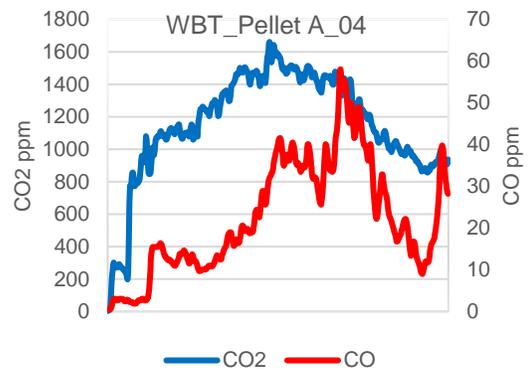
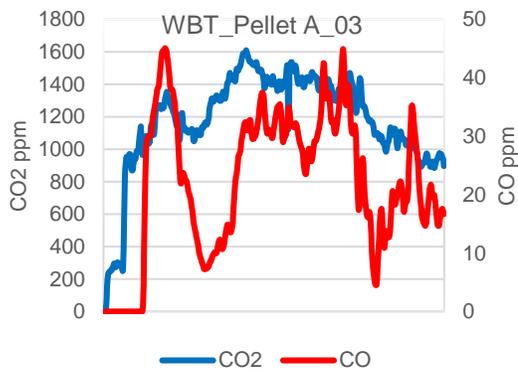
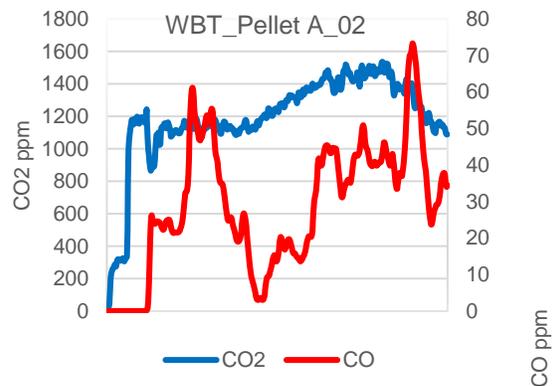
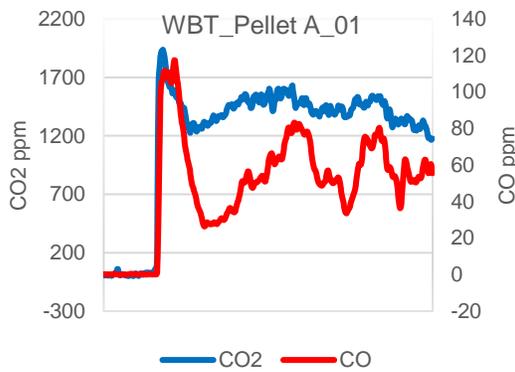


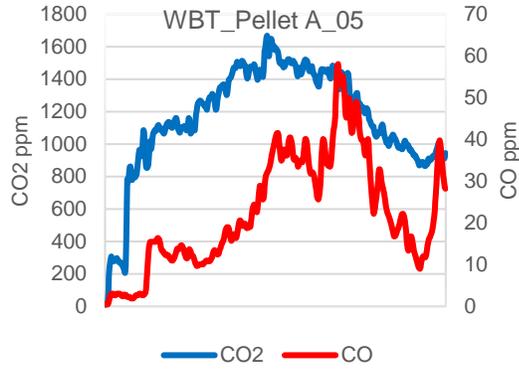


Emisiones de CO y CO₂ en el uso de los pellets

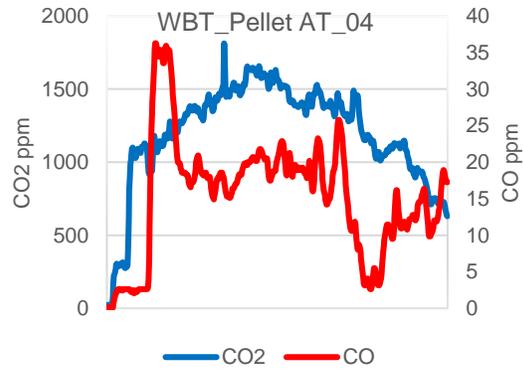
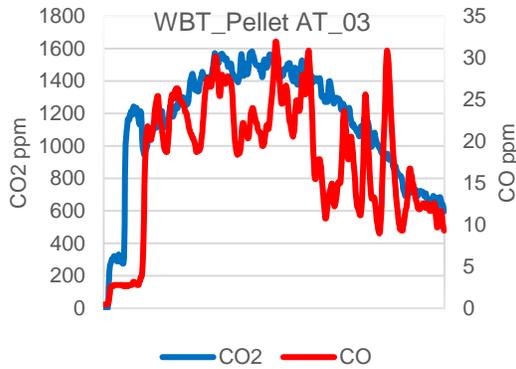
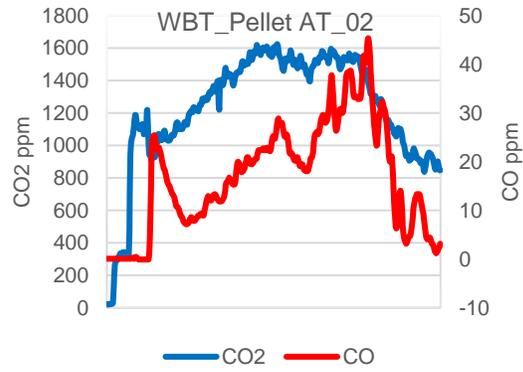
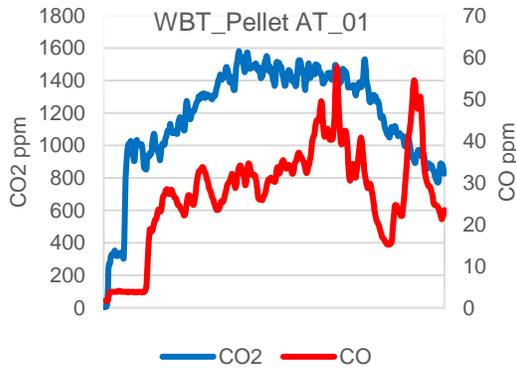
Pruebas WBT

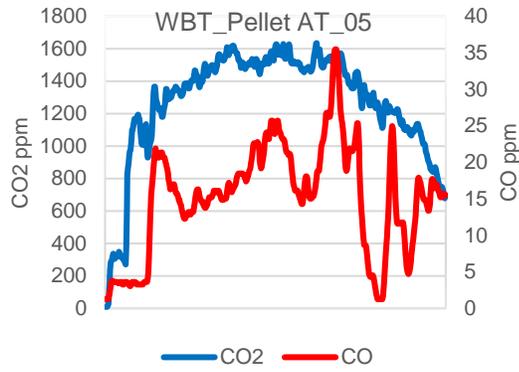
Pellets de Aserrín de pino



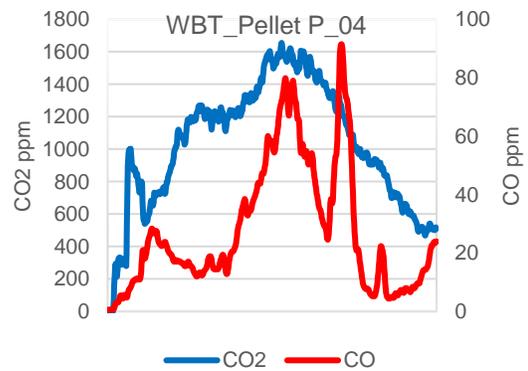
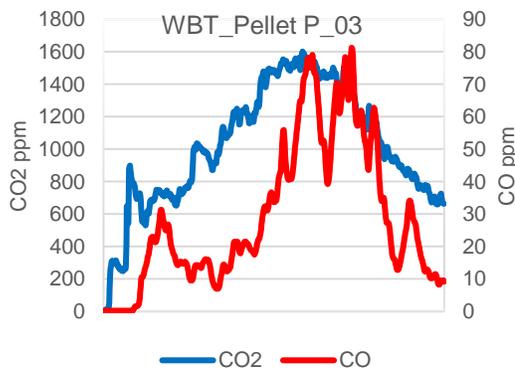
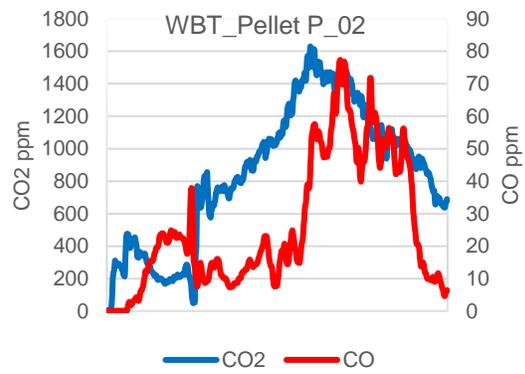
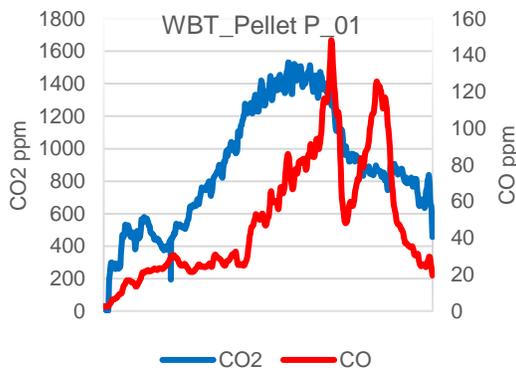


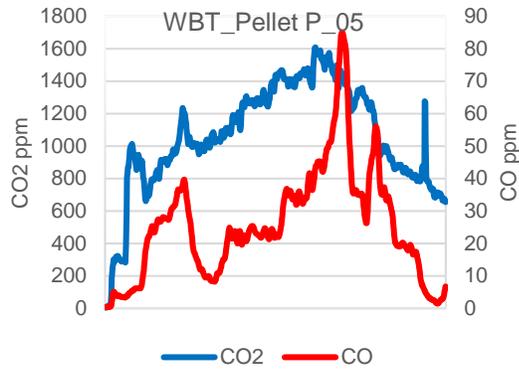
Pellets Aserrín de pino+Aserrín de pino Torrefactado (AT)





Pellets de poda de arándano (P)





Pellets de poda de arándano+poda de arándano torrefactada (PT)

