

Autor

Nombre de la tesis

Año



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Modelado y simulación de la conversión de bagazo de  
agave para la producción de pellets combustibles

Tesis

Que como parte de los requisitos para  
obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias en Ingeniería de Biosistemas

Presenta

Ing. Eliud Escudero Enríquez

Dirigido por:

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Co-Director:

Nombre completo del Co-Director de tesis (en su caso)

Querétaro, Qro. a \_\_\_\_\_

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



## Portada Interna de Tesis

Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias en Ingeniería en Biosistemas

Modelado y simulación de la conversión de bagazo de agave para la producción de pellets combustibles  
**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias en Ingeniería de Biosistemas

### Presenta:

Ing. Eliud Escudero Enríquez

### Dirigido por:

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

### SINODALES

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Sergio Iván Martínez Guido  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

M. en C. Valeria Caltzontzin Rabell  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Oscar Daniel Lara Montaña  
Suplente 1

\_\_\_\_\_  
Firma

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez  
Suplente 2

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad

\_\_\_\_\_  
Nombre y Firma  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.

28 de Junio de 2024

## DEDICATORIAS

A mis papás

Jacinta Enríquez Baltazar y Miguel Escudero Villegas

Qué siempre han velado por mí, para que nada me falte en esta vida.  
Los amo con todo mi ser.

A mi hermano.

Miguel Ángel Escudero Enríquez, por su invaluable compañía.

A la vida

Por darme la oportunidad de dar este paso en mi formación profesional, y por todas las aventuras que viví en el camino.

## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento en especial a la Doctora Claudia Gutiérrez Antonio por su amabilidad, por ser mi guía durante este proceso y por toda la paciencia que ha tenido conmigo.

Al grupo de investigación de Procesos Sustentables de Producción de Bioproductos por acogerme en su grupo, por su paciencia y por enseñarme tantas cosas. No sólo por el ámbito académico, también por ser maravillosas personas.

Hablando de maravillosas personas, le agradezco a mis compañeros de maestría, a Luz Andrea, Itzia, Jhasua, Kenia y Leslie por esta conmigo en esta travesía. Poder compartir mis días con ustedes han hecho de esta aventura aún más fantástica.

Agradezco al CONAHCYT por el apoyo económico brindado que me permitió llevar a cabo este proceso de formación profesional garantizándome una manutención.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	11
1.1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.2 ANTECEDENTES.....	13
1.2.1 Propuestas de valorización del bagazo de agave para la obtención de productos de valor agregado.....	13
1.2.2 Bioetanol a partir de bagazo de agave.....	14
1.2.3 2,3-Butanodiol a partir de bagazo de agave.....	15
1.2.4 Biometano a partir de bagazo de agave.....	16
1.2.5 Biohidrógeno a partir de bagazo de agave.....	17
1.2.6 Elaboración en secuencia de más de un biocombustible a partir de bagazo de agave.....	19
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	21
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	22
1.5 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	23
Hipótesis.....	23
Objetivo general.....	23
Objetivos específicos.....	23
CAPÍTULO II.....	24
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	24
2.1 AGAVE TEQUILANA.....	24
2.2 TEQUILA.....	24
2.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL TEQUILA.....	25
2.5 ECONOMÍA CIRCULAR.....	26
2.6 PROCESOS DE REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS.....	27
2.7 BIOMASA.....	27
2.8 BIORREFINERÍAS.....	27
2.9 CULTIVO DE HONGOS.....	28
2.10 BIOCMBUSTIBLES.....	28
2.11 PELLETS COMBUSTIBLES.....	28
CAPÍTULO III.....	32
3 METODOLOGÍA.....	32
3.1 MATERIALES.....	32

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA DE PARTIDA.....	33
3.3 ELABORACIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES.....	34
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE LOS PELLETS.....	34
3.5 MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE LOS PELLETS.....	35
CAPÍTULO IV .....	38
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA .....	38
4.2 ELABORACIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES .....	39
4.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS PELLETS OBTENIDOS.....	41
4.5 MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PELLETS.....	49
5 CONCLUSIÓN .....	52
PERSPECTIVAS .....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54

## FIGURAS

<b>1.1</b> Producción total de tequila en el periodo 1995 y 2022 .....	12
<b>2.1</b> <i>Agave Tequilana</i> Weber var. Azul .....	24
<b>4.1</b> Representación gráfica de los resultados obtenidos para las propiedades de los pellets elaborados. Las letras indican a que grupo estadístico corresponde cada valor, de acuerdo con la prueba MDS de Tukey con $p < 0.05$ .....	43
<b>4.2</b> Representación gráfica de los resultados obtenidos para el análisis de dos factores de las propiedades de los pellets elaborados a partir de bagazo de agave empleado como sustrato de hongo. ....	47
<b>4.3</b> Regresión lineal entre las variables de contenido de cenizas y poder calorífico superior. ....	48
<b>4.4</b> Representación gráfica de los resultados obtenidos para las propiedades de los pellets elaborados al comparar todos y cada uno de los pellets elaborados. Las letras indican a que grupo estadístico corresponde cada valor, de acuerdo con la prueba DMS de Tukey con $p < 0.05$ .....	49
<b>4.5</b> Modelo elaborado para la producción de pellets combustibles a partir de bagazo de agave. ....	50
<b>4.6</b> Modelo elaborado para la simulación del proceso de elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave usado como sustrato para la elaboración de hongos. ....	51



## TABLAS

<b>1.1</b> Composición principal del bagazo de agave de acuerdo con estudios reportados en la literatura. ....	12
<b>1.2</b> Propuestas de revalorización de bagazo de <i>Agave Tequilana Weber</i> var. Azul no orientadas a la elaboración de biocombustibles. ....	13
<b>3.1</b> Tratamientos del experimento de dos factores de bagazo de agave con pretratamiento fúngico. ....	32
<b>3.2</b> Variables estudiadas en las biomásas de partida y método mediante el cual fueron cuantificadas respectivamente. ....	33
<b>3.3</b> Tamaños de partícula empleados para el proceso de pelletización. ....	34
<b>3.4</b> Módulos contemplados para la modelación de cada una de las etapas del proceso de pelletización. ....	35
<b>4.1</b> Valores de los parámetros analizados en el bagazo de agave de este estudio, así como de estudios previos. ....	38
<b>4.2</b> Operaciones que se consideran en la elaboración de pellets combustibles. ....	39
<b>4.3</b> Datos de distribución de tamaño de partícula y humedad recopilados durante el proceso de elaboración de pellets combustibles. ....	39
<b>4.4</b> Valores de los parámetros analizados en los pellets obtenidos. La norma mencionada es la EN-ISO 17225-2 (ISO, 2021). ....	41
<b>4.5</b> Resultados de los ANOVA de dos factores para poder calorífico superior, contenido de humedad y contenido de cenizas. ....	45
<b>4.7</b> Estimación de costos de equipamiento desglosado por equipo para cada uno de los sistemas de producción modelados (USD). ....	52
<b>4.8</b> Estimación de ingresos para cada uno de los sistemas de producción modelados (USD). ....	52

## RESUMEN

En el presente trabajo se llevó a cabo la elaboración de pellets combustibles a partir de dos biomásas, bagazo de agave y bagazo de agave usado para elaboración de hongo rosa. Se determinaron los parámetros fisicoquímicos de poder calorífico, la humedad y el contenido de cenizas de ambas biomásas, así como su contenido elemental de carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre. Posteriormente se llevó a cabo la pelletización mediante una molienda, tamizado, pelletizado y secado, se registraron los valores de masa antes y después de cada proceso. Los pellets obtenidos fueron evaluados con los parámetros fisicoquímicos antes mencionados y los resultados contrastados con la norma ISO 17225-1 para evaluar si estos pellets cumplen con la normativa para su comercialización y uso de manera residencial. Por último, se emplearon los valores de masa capturados, la información del proceso de pelletización y la información del proceso de producción de hongos para realizar el modelado y simulación de un esquema completo de elaboración de hongos y/o pellets de las biomásas empleadas; los procesos se escalaron usando de referencia un flujo equivalente a la generación total anual de bagazo de agave en la industria tequilera para el año 2023. Se encontró que la elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave y de bagazo de agave usado como sustrato para la elaboración de hongo rosa es técnicamente factible. Ninguno de los pellets elaborados cumple con la normativa, siendo los pellets más promisorios los elaborados a partir de bagazo de agave usado como sustrato para cultivo de hongo rosa en una mezcla 70% bagazo de agave 30% rastrojo de maíz, con tiempos de cultivos de 30 y 60 días. También se encontró que el esquema de elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave es el que mejor costo de equipamiento tiene, mientras que el esquema de producción en serie de hongo rosa y pellets combustibles a partir de bagazo de agave tiene mayor costo, pero también mayor ingreso bruto estimado a partir de los bienes producidos en el sistema.

## SUMMARY

In this work pelletization assays were done with two different biomasses, agave bagasse and agave bagasse previously used as mushroom substrate for Pink Oyster. Physicochemical parameters heat of combustion, moisture, ash content as well as elemental content carbon, nitrogen, hydrogen, and sulfur were carried out for both biomasses. Afterwards, biomasses underwent pelletization process comprehending milling, sieving, densification and drying, mass values before and after every step were registered. The same aforementioned parameters analysis was carried out for obtained pellets as well, the results were compared against ISO 17225-1 normative to know whether or not these pellets fulfill requirements for its commercialization and residential usage. Lastly, registered mass values, acquired information from pelletization process and pink oyster culture information were gathered and used for modeling and simulation of mushroom and/or pellet production process using agave bagasse as raw material. The reference for flux calculation was total agave bagasse generated by tequila industry in 2023. Pellet making from all biomasses tested was technically feasible. None of the obtained pellets fulfill ISO normative though. Pellets obtained from agave bagasse uses as mushroom substrate in a 70% agave bagasse 30% corn stover for 30 and 60 days showed the most promising parameters. Pellet making directly from agave bagasse has the least estimated equipment cost. Pink oyster and pellet making process has the most expensive estimated equipment cost and has as well the highest gross income.

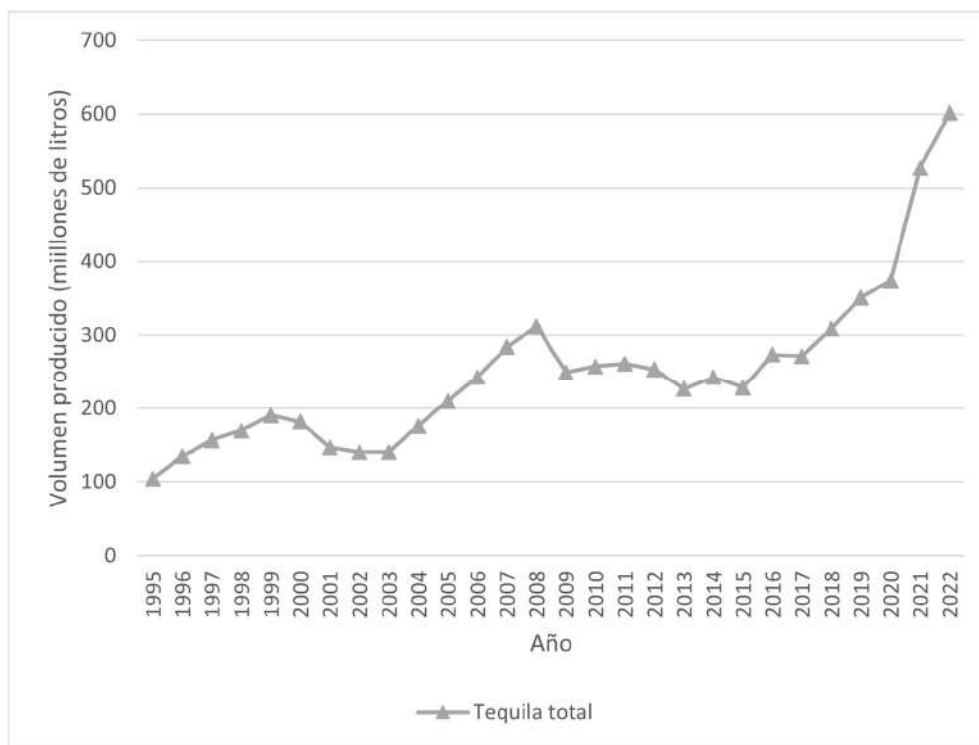
## **CAPÍTULO I**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Se estima que a nivel mundial la generación de residuos se incrementó de 1,300 millones a 2,010 millones de toneladas durante el período 2012-2016; esto representa un aumento aproximado del 55%, y se pronostica que para 2050 la producción ascenderá a 3,400 millones de toneladas. En el año 2016, del total de residuos producidos, el 44% correspondió a la categoría de residuos verdes y residuos alimenticios; entre éstos se incluyen restos de poda, hojas, ramas, entre otros (World Bank Group, 2018).

En México también se ha tenido un aumento considerable en la generación de residuos. Los datos reportados indican que entre el año 2003 y 2015 la generación de residuos sólidos urbanos se incrementó de 42.86 millones de toneladas a 53.1 millones de toneladas, lo que representa un aumento de 61.2% (SEMARNAT, 2015). Se estima que, en el año 2012, el sector agroindustrial generó 52,104 millones de toneladas con potencial energético (SEMARNAT 2020). Es importante mencionar que, no sólo las cantidades de residuos generadas son altas, sino que, además, se prevé un incremento en el corto y mediano plazo.

En particular, una de las industrias que mayor crecimiento ha tenido es la tequilera. En los últimos 10 años, la industria del tequila ha aumentado su producción en 45.24% (CRT, 2021) (Figura 1.1). El crecimiento de la industria tequilera impacta de manera positiva a los indicadores económicos del país, tales como el número de empleos, exportaciones, inversiones, entre otros (SECTUR 2013; CRT 2021; BECLE 2022). Sin embargo, el aumento en la producción de esta popular bebida trae consigo un incremento en la generación de residuos (CRT 2021).



**Figura 1.1** Producción total de tequila en el período 1995 y 2022.

La industria tequilera genera residuos durante el proceso de elaboración de tequila, siendo los principales el bagazo y la vinaza. El bagazo es un residuo fibroso que se genera durante la molienda de la cabeza de agave, y representa el 40% de su peso. Por otra parte, la vinaza es el líquido residual que se genera en la etapa de destilación (Cedeño, 1995). La Comisión Reguladora del Tequila estima que en 2020 se generaron cerca de 562 miles de toneladas de bagazo (CRT, 2021). Los tres principales componentes del bagazo de agave, en base seca, son celulosa, lignina y hemicelulosa, como puede observarse en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1** Composición principal del bagazo de agave de acuerdo con estudios reportados en la literatura.

Compuesto	Alonso & Rigal (1997)	Liñán-Montes et al. (2014)	Kestur G. et al. (2013)	Rosas-Aburto et al. (2021)
Celulosa (% masa)	43	41.86	73.6	51.82
Lignina (% masa)	15	7.04	21.1	16.64
Hemicelulosa (% masa)	19	4.41	-	28.18
Nitrógeno Total (% en masa)	3	2	-	-
Pectinas (% masa)	1	-	-	-

Grasas (% masa)	1	-	-	-
Azúcares reductores (% masa)	5	-	-	-
Cenizas (% masa)	6	7.4	5.3	2.57
Otros (% masa)	2	-	-	-
Humedad (% masa)	5	6.44	-	-

En la actualidad, el bagazo generado en las zonas de producción de tequila se emplea para la obtención de composta (CRT, 2019). Esto genera un serio problema de contaminación, que implica la acidificación de los suelos (los residuos poseen un pH cercano a 5.4); además, el bagazo de agave usualmente permanece a campo abierto por periodos de más de 20 semanas durante el proceso de composteo (Cedeño, 1995; Crespo, 2011; CRT, 2019).

## 1.2 ANTECEDENTES

### 1.2.1 Propuestas de valorización del bagazo de agave para la obtención de productos de valor agregado

Ante la problemática que existe con el bagazo de agave se han realizado trabajos para estudiar el aprovechamiento inmediato del bagazo mediante su quema directa; sin embargo, su elevado contenido de agua dificulta dicho tratamiento. Debido a ello, se han enfocado los esfuerzos en el desarrollo de procesos de conversión de este residuo, que posibiliten la generación de productos que puedan ser reinsertados en el mercado. A continuación, en la Tabla 1.2, se presentan los estudios científicos reportados sobre la revalorización de este residuo.

**Tabla 1.2** Propuestas de revalorización de bagazo de *Agave Tequilana Weber* var. Azul no orientadas a la elaboración de biocombustibles.

Referencia	Producto	Viabilidad Técnica
Iñiguez-Covarrubias et al. (2001)	Aglomerado	Sí
Langhorst et al. (2018)		Sí
Huerta-Cardoso et al. (2020)		Sí
Urías-Silvas et al. (2008)	Fructanos	Sí
Zamora-Gasga et al.	Barras de granola	Sí

Ahora bien, con respecto a propuestas de aprovechamiento del bagazo de agave para la producción de biocombustibles se han reportado diferentes propuestas.

### 1.2.2 Bioetanol a partir de bagazo de agave

Existen reportes de pruebas de elaboración de etanol a partir de bagazo de agave tequilana var. Weber, así como de biomásas provenientes de otros agaves. Aguilar et al. (2018) sometieron bagazo a un pretratamiento hidrotérmico (autohidrólisis) en condiciones isotérmicas y no-isotérmicas con un rango de temperatura entre 160 °C y 180 °C. Posteriormente, se pre-sacarificó la biomasa pre-tratada por 24 h y se fermentó. Los rendimientos reportados van de 98.5% a 99.5% para la sacarificación, y de 90.84% y 87.56% para la producción de etanol.

En otro experimento, el bagazo fue pre-tratado en una autoclave y sometiéndolo a atmósferas de CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O en un rango de temperaturas de entre 150 °C y 190 °C con tiempos de residencia de entre 10 y 50 minutos. La biomasa pre-tratada se sometió a hidrólisis enzimática, y posterior fermentación obteniendo un rendimiento de 75.8% para la sacarificación y de 72% para la producción de etanol (Aguirre-Fierro et al., 2020).

Arrizon et al. (2012) emplearon, entre otras biomásas, bagazo de A. tequilana Weber var. Azul; el bagazo se sometió a un pretratamiento con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 1% (m/m) y a una corriente de vapor de agua a 170 °C por 5 minutos. Posteriormente, se hidrolizó con Celluzye (una enzima comercial) y finalmente se fermentó, reportando un valor de rendimiento del 85.5% para la producción de etanol.

Muestras de dos diferentes bagazos, uno de A. tequilana Weber var. Azul y otro de Agave Karwinskii, se sometieron a pretratamiento ácido dentro de una autoclave a 121 °C y 1.1 atm empleando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1% (v/v). El bagazo pretratado fue subsecuentemente sometido a otro tratamiento con la intención de optimizar el rendimiento, variando valores de concentración de peróxido de hidrógeno (de 1% a 3%), tiempos (24, 36 y 48 h) y relaciones líquido-sólido (8:1, 12:1 y 16:1 ml:g); las biomásas se sometieron a una solución alcalina con pH de 11.5 (ajustado con hidróxido de sodio) a 25 °C. Una vez concluidos ambos pretratamientos se realizó la hidrólisis y la fermentación. Los rendimientos reportados fueron

86.29% de conversión de celulosa y 93.1% de eficiencia de fermentación para *A. tequilana*, y 56.33% conversión de celulosa y 90.41% eficiencia de fermentación para *A. Karwinskii* (Delfin-Ruíz et al., 2021).

Flores-Gómez et al. (2018) emplearon bagazo de *A. tequilana* Weber var. Azul y Agave Salmiana. En su estudio sometieron ambas biomásas a expansión de fibra de amoníaco (AFEX por sus siglas en inglés) como pretratamiento; las materias primas se introducen a un contenedor con amonio por breves períodos de tiempo para después someterse a hidrólisis y fermentación, con una sacarificación reportada de 85% y un rendimiento de etanol del 90%.

En otro experimento, el bagazo de *A. tequilana* Weber var. Azul se sometió a un proceso combinado de extrusión-sacarificación; el bagazo se introduce en una extrusora de tornillo sin fin que se compone de diez módulos, dentro de la misma hay un proceso de flujo de hidróxido de sodio al 5% (m/v), calentamiento a 50 °C, neutralización con ácido fosfórico, mezclado y prensado. Dentro de la extrusora se adicionó también una mezcla de enzimas durante el mezclado y prensado con la intención de realizar la hidrólisis a la par; una vez que pasó por el extrusor se almacenaba en un contenedor para que la hidrólisis continuara por 24 h más. El resultado de ese procesamiento se sometió posteriormente a fermentación. Los rendimientos reportados fueron de 72% para la sacarificación y 78.5% para la producción de etanol (Montiel et al., 2016).

Pérez-Pimienta et al. (2017) evaluaron dos pretratamientos para la valorización de una muestra de bagazo de *A. tequilana* Weber var. Azul. Como primer pretratamiento a evaluar se emplearon líquidos iónicos, específicamente acetato de 1-etil-3-metilimidazolio con una carga de biomasa de 10% (m/m) a 120 °C por 3 h. Por otra parte, también se evaluó un pretratamiento mediante organosolvatación, específicamente empleando etanol y ácido sulfúrico, empleando una mezcla de 74.5% agua, 25% etanol y 0.5% ácido sulfúrico en un reactor químico de alta presión a 160 °C por 10 minutos. Una vez terminado el pretratamiento, las biomásas se sometieron a una sacarificación y fermentación secuencial.

### 1.2.3 2,3-Butanodiol a partir de bagazo de agave

Otro biocombustible líquido del que existe antecedente es el 2,3-butanodiol. Pasaye-Anaya et al. (2019) trabajaron con bagazo de Agave cupreata (un subproducto de la industria mezcalera); ellos sometieron esta biomasa a un pretratamiento de hidrólisis ácida



mediante la adición de ácido sulfúrico al 5% por 1 h a 121 °C con una relación 1:10 (sólido:líquido). La biomasa pretratada se sometió a hidrólisis con mezcla de las enzimas comerciales Cellic® CTec3 y Cellic® HTec3 incubándolo a 50 °C por 48 h. Posteriormente se empleó una cepa nativa de *Klebsiella oxytoca* para llevar a cabo la fermentación, incubando una muestra del bagazo pretratado a 30 °C por 48 h. Se reportó un rendimiento de producción de 2,3-butanodiol del 80%.

#### 1.2.4 Biometano a partir de bagazo de agave.

En el caso del biometano, Valdez-Vazquez et al. (2020) evaluaron diferentes pretratamientos: enzimático, con Cellulase 50XL una enzima comercial, biológico, empleando líquido ruminal, biológico, empleando microbiota nativa, termoquímico, utilizando reactores de explosión por vapor, pretratamiento en medio ácido, pretratamiento con ozono y sacarificación. Los resultados obtenidos reportan un rendimiento promedio de  $219 \pm 15$  mL/gCOD similar para todos los pretratamientos, variando en las tasas de producción y también en el tipo de subproductos que se generaban.

Hernández-Vázquez et al. (2020) sometieron una muestra de bagazo de Agave tequilana Weber var. Azul a un pretratamiento hidrotérmico de explosión por vapor, haciendo un barrido de diferentes condiciones de temperatura y tiempo de reacción. Ellos encontraron que las máximas concentraciones de COD, glucosa y arabinosa fueron obtenidas en los hidrolizados pretratados a 154 °C por 10 minutos; además, se reportó que la concentración de inhibidores (fenoles, furfural, HMF y ácido acético) no calificaba como tóxica. El rendimiento de metano fue reportado como 215 NmL/gCOD.

Buitrón et al. (2019) emplearon, entre otras biomásas, bagazo de agave sin reportar la especie; este bagazo provenía del procesamiento para la obtención de etanol. La biomasa fue pretratada mediante explosión por vapor a 150 °C y 45 psig por un lapso de 40 minutos, y posteriormente se separó en una fracción sólida y una líquida; ambas fracciones se sometieron a una prueba de potencial de producción de biometano mediante digestión anaeróbica. Los rendimientos reportados fueron para la fracción líquida  $252 \pm 15$  mL/gVS o de  $178 \pm 11$  mL/gCOD y para la fracción sólida de  $62 \pm 2$  mL/gCOD.

Arreola-Vargas et al. (2015) realizaron la hidrólisis en medio ácido para la extracción de azúcares en dos bagazos de Agave tequilana, uno cocido y otro crudo; debido

a la detección de 5-hidroximetilfurfural en el bagazo cocido se decidió emplear únicamente bagazo crudo para las pruebas de producción de metano. Cuando emplearon reactores anaeróbicos secuenciales por lotes, sin incorporación de nutrientes, se reportó un rendimiento de 260 mL/g<sub>COD</sub>; mientras que, al incorporar nutrientes, se observó una supresión en la producción de metano.

Breton-Deval et al. (2018) emplearon bagazo de Agave tequilana. Evaluaron dos pretratamientos de la biomasa uno con HCl y otro con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, los hidrolizados obtenidos se sometieron al procedimiento de reactor anaerobio secuencial por lotes. Debido al uso de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se reportó la presencia de compuestos inhibidores (furanos y ácido acético). El rendimiento máximo reportado fue de 280 mL/g<sub>COD</sub>.

Vital-Jácome et al. (2022) realizaron un pretratamiento con líquido ruminal seguido de reacción anaeróbica en un reactor; también analizaron el efecto de programar cambios en los tiempos de retención hidráulica dentro del reactor en el rendimiento de metano. Se reportaron rendimientos máximos de  $213.5 \pm 18.9$  mL/g<sub>COD</sub>.

Tapia-Rodríguez et al. (2019) emplearon bagazo de Agave tequilana Weber var. Azul. Los autores sometieron el bagazo a diversos tipos de hidrólisis enzimáticas, tales como Stonezyme, Cellulase 50 XL, Zymapect, y Celluclast. La fermentación se llevó a cabo empleando un reactor por lotes. Se reportaron rendimientos de hidrógeno entre  $330 \pm 20$  y  $270 \pm 0.00$  mL CH<sub>4</sub>/g<sub>COD</sub>.

Duran-Cruz et al. (2021) evaluaron pretratamientos de explosión por vapor, así como diferentes enzimas para la hidrólisis enzimática para producir metano a partir de bagazo de Agave tequilana Weber var. Azul. Los resultados obtenidos mostraron que el pretratamiento de explosión por vapor a 142 °C por 15 minutos seguidos del uso de la enzima Cellic Ctec2 dan un rendimiento de 284 mL CH<sub>4</sub>/g<sub>COD</sub>.

### 1.2.5 Biohidrógeno a partir de bagazo de agave

En cuanto a los experimentos reportados de producción de biohidrógeno a partir de agave, Montoya-Rosales et al. (2019) evaluaron hidrolizados de bagazo de Agave tequilana obtenido mediante dos pretratamientos enzimáticos; uno de ellos individual (Stonezyme) y otro binario (Celluclast-Viscozyme), para la elaboración continua de hidrógeno empleando

dos tipos de reactores, uno de agitación continua y otro de goteo. Los rendimientos máximos obtenidos fueron en el reactor de agitación continua con el pretratamiento binario reportando un valor de 13 L H<sub>2</sub>/L-d.

Contreras-Dávila et al. (2017) realizaron la producción continua de hidrógeno con hidrolizados enzimáticos de Agave Tequilana evaluando distintas relaciones de carga y configuraciones de reactor, las cuales fueron reactor de agitación continua y reactor de goteo. El rendimiento máximo reportado es de 3.45 L H<sub>2</sub>/L-d para una carga de 52.9 g COD/L-d y corresponde al reactor de agitación continua.

Muñoz-Páez et al. (2020) usaron bagazo de agave tequilana como sustrato. La biomasa fue pretratada con HCl 1.4% (v/v) a 124 °C por 2.1 h. Para ello emplearon un reactor anaeróbico de lotes secuenciales (AnSBR por sus siglas en inglés) y un reactor anaerobio de lecho expandido (ESGB por sus siglas en inglés). Los rendimientos del reactor anaeróbico de lotes secuenciales fueron de 226 ± 53 mL H<sub>2</sub>/L-d con cargas de 3.2 a 4.5 g<sub>cho</sub>/l-g, mientras que el reactor de lecho expandido obtuvo un rendimiento de 361 ± 130 mL H<sub>2</sub>/L-d con cargas de 7.4 g<sub>cho</sub>/L-d.

Valdez-Guzmán et al. (2019) emplearon bagazo de Agave tequilana pretratado con ácido, comparando una biomasa pretratada detoxificada y una no detoxificada. La detoxificación se realizó añadiendo diferentes concentraciones de carbón activado y valores de pH. La producción de hidrógeno se llevó a cabo mediante fermentación por lotes. Los rendimientos reportados de las biombras pretratadas fueron de 1.71 mol H<sub>2</sub>/mol<sub>azúcares</sub> para la biomasa detoxificada, y 1.23 mol H<sub>2</sub>/mol<sub>azúcares</sub> para la biomasa no detoxificada.

Valencia-Ojeda et al. (2021) utilizaron bagazo de Agave tequilana. Los autores emplearon Cellulase 50XL para la hidrólisis enzimática de la biomasa, y se evaluó también su uso conjunto con Viscozyme L. La reacción de fermentación oscura se llevó a cabo en tanques de agitación continua. Los valores máximos fueron para los hidrolizados de Cellulase 50XL empleando carga de orgánicos de 100 g<sub>COD</sub>/L-d, reportando 9.9L H<sub>2</sub>/L-d.

Tapia-Rodríguez et al. (2019) emplearon bagazo de Agave tequilana Weber var. Azul. Los autores sometieron el bagazo a diversos tipos de hidrólisis enzimáticas con Stonezyme, Cellulase 50 XL, Zymapect, y Celluclast. La fermentación se llevó a cabo

empleando un reactor por lotes. Se reportaron rendimientos de hidrógeno entre  $2.32 \pm 0.03$  y  $3.81 \pm 0.13$  mol H<sub>2</sub>/mol<sub>Hexosa</sub>.

#### 1.2.6 Elaboración en secuencia de más de un biocombustible a partir de bagazo de agave

De manera alternativa también existen publicaciones donde se reporta la elaboración de manera secuencial de hidrógeno en primer lugar, seguido de metano a partir de los residuos de la fermentación anterior.

Arreola-Vargas et al. (2016) sometieron bagazo de Agave tequilana a dos pretratamientos distintos, uno con digestión ácida y otro con digestión enzimática. Las biomásas hidrolizadas se sometieron a procesos de digestión diferentes, de una y de dos etapas. Los rendimientos máximos reportados son de 3.4 mol H<sub>2</sub>/mol hexosa para el hidrolizado enzimático con cargas de 40% y 240 mL CH<sub>4</sub>/g COD para ambos hidrolizados con cargas de 20%.

Rios-Del Toro et al. (2021) emplearon bagazo de Agave tequilana. Primeramente, sometieron el bagazo a un pretratamiento ácido, detoxificación de los hidrolizados con carbón activado; y, por último, a una digestión anaeróbica de dos etapas tanto para hidrolizados detoxificados y no detoxificados. En este estudio los hidrolizados detoxificados presentaron un mejor rendimiento; sin embargo, la energía total recuperada no mostró diferencia significativa. Se reportaron rendimientos de  $1.11 \pm 0.05$  mol H<sub>2</sub>/mol glucosa y  $200 \pm 20$  ml CH<sub>4</sub>/g<sub>COD</sub> para el hidrolizado no detoxificado, y  $1.81 \pm 0.14$  mol H<sub>2</sub>/mol glucosa y  $180 \pm 50$  ml CH<sub>4</sub>/g<sub>COD</sub> para el hidrolizado detoxificado. Continuando con sus experimentos, Rios del Toro et al. (2021) buscaron adaptar su metodología previa a un sistema de producción semi continuo reemplazando el reactor por lotes por un sistema de reactores por lote secuenciados. En este experimento evaluaron la adición de nutrientes a la fermentación y, como en otros trabajos, también se concluyó que no había necesidad de adicionar nutrientes al proceso. Se reportaron rendimientos de 10 y 26.30 mL H<sub>2</sub>/L-h para los hidrolizados no detoxificado y detoxificado, respectivamente, y de 480 y 440 mL CH<sub>4</sub>/L-d para hidrolizado no detoxificado y detoxificado respectivamente.

De igual manera, Toledo-Cervantes et al. (2018) emplearon bagazo de Agave tequilana en un sistema de producción semi continuo. El objetivo del estudio fue obtener las condiciones óptimas de cargas de biomasa, y ciclos de trabajo. El rendimiento de hidrógeno

se reportó en  $1.6 \text{ mol H}_2/ \text{ mol}_{\text{sacarosa}}$ . En el caso del metano, en este trabajo no logró concatenarse la reacción para la producción de metano, como paso posterior a la fermentación oscura.

Montiel y Razo-Flores (2018) trabajaron con bagazo de Agave tequilana, la biomasa se sometió a un pretratamiento de hidrólisis enzimática con Celluclast®. Posteriormente, los hidrolizados se sometieron a un sistema de producción continuo mediante procesos secuenciales. Primero un reactor de agitación continua para la fermentación oscura, dando como producto hidrógeno, en el cual se evaluaron diferentes tiempos de agitación; el efluente se transfirió a un reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) para la obtención de metano modificando la carga de efluente que alimentaba el reactor. En este estudio se reportaron rendimientos de hasta  $6 \text{ L H}_2/\text{L-d}$  de hasta  $6.4 \text{ L CH}_4/\text{L-d}$ .

En particular, en la literatura se han reportado estudios de la conversión de bagazo de agave para producción de biocombustibles; sin embargo, los rendimientos son muy bajos, y no reportan estimados en cuestión financiera. Cabe destacar que existe poca investigación con respecto a la elaboración de biocombustibles sólidos a partir de bagazo de agave. De hecho, en la búsqueda realizada sólo se encontró con un artículo y, además, dicho artículo no toma como biomasa el bagazo de agave tequilana weber var. Azul proveniente de la industria del tequila. Por último, tampoco presenta un estimado financiero de los resultados obtenidos.

Por ello, en este trabajo se propone la conversión de bagazo de agave para obtener pellets combustibles; para ello se considerará al bagazo en su estado natural, así como el resultante de su pretratamiento fúngico, con la finalidad de evaluar el rendimiento y calidad de los pellets combustibles. Con base en los datos experimentales, se realizará el modelado y simulación de la conversión de bagazo de agave mediante el software Aspen Plus. Con base en los resultados de la simulación, los procesos de revalorización serán evaluados en términos del consumo de energía, rendimiento de los productos, y emisiones de dióxido de carbono. Los resultados serán comparados con los procesos de conversión del bagazo de agave para la obtención de otros biocombustibles, previamente reportados en la literatura.

### 1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente, existen propuestas para el aprovechamiento del bagazo de agave; sin embargo, éstas carecen de estudios tecno-económicos (Iñiguez-Covarrubias et al., 2001; Alemán-Nava et al., 2017). Otras propuestas emplean procesos que toman plazos de 4 meses o más para llevarse a cabo (Rodríguez et al., 2013). Por ello, se deben tener alternativas más rentables y con altos rendimientos; esto permitirá contar con procesos sustentables para su revalorización, con posibilidades de implementación industrial. Esto implica el análisis de nuevos procesos de revalorización, considerando aspectos económicos y ambientales.

En este contexto, el contenido de lignina del bagazo de agave lo convierte en una alternativa viable para la producción de biocombustibles sólidos; cabe mencionar que esta alternativa no ha sido explorada. Adicionalmente, se considerará el bagazo en su estado natural, así como el bagazo después de la aplicación de un pretratamiento fúngico; dicho pretratamiento buscará mejorar la composición del residuo para que los biocombustibles sólidos sean de mejor calidad. Dicho esto, la incógnita científica comprende la determinación de indicadores económicos y ambientales (emisiones de CO<sub>2</sub>, costos, etc.) de la conversión del bagazo de agave, en estado natural y pre-tratado, para la producción de pellets combustibles. Los indicadores antes mencionados se calcularán para ambos procesos. En ambos esquemas de procesamiento se deben mantener los parámetros de calidad de los productos seleccionados.

#### 1.4 JUSTIFICACIÓN

El bagazo de agave es uno de los principales residuos en la producción de tequila, y se estima que se generaron alrededor de 562 mil toneladas en 2020 (CRT, 2021.) Este bagazo presenta una difícil degradación y su compostaje ronda los 140 días; además, su bajo pH representa un riesgo y puede afectar la calidad del suelo (Rodríguez et al. 2013). En particular, para la revalorización del bagazo de agave se han propuesto una gran cantidad de procesos individuales de conversión. Estos procesos son factibles técnicamente, pero no necesariamente desde el punto de vista financiero, ya que en muchos de ellos los rendimientos son bajos. Por ello, los procesos de revalorización deben garantizar altos rendimientos y bajo impacto ambiental; de esta manera, las alternativas serán sustentables, con mayor rentabilidad, y, además, se encontrarán alineados al modelo de Economía Circular.

Con base en lo anteriormente expuesto es necesario contar con esquemas de procesamiento sustentables para la conversión del bagazo de agave. En aras de contar con un proceso que pueda ser implementado a nivel industrial es necesario realizar el modelado y simulación de este esquema de procesamiento, para así evaluar los costos totales anuales, emisiones de dióxido de carbono, y estimar los precios de los productos resultantes. De esta forma se puede analizar la factibilidad técnica y económica del proceso de revalorización propuesto. Cabe añadir que el modelado propuesto se realizará con base en datos experimentales.

## 1.5 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

### Hipótesis

Los pellets combustibles obtenidos del bagazo de agave empleado como sustrato para la producción de hongos tienen los mismos parámetros de calidad y rendimiento estimado mediante modelado y simulación, que aquellos pellets combustibles producidos directamente de bagazo de agave.

### Objetivo general

Elaborar pellets combustibles a partir de bagazo de agave, con y sin pretratamiento fúngico, para comparar los parámetros de calidad de acuerdo con la norma ISO 17225, así como los rendimientos estimados mediante modelado y simulación del proceso.

### Objetivos específicos

- Caracterizar las biomásas, con y sin pretratamiento fúngico, para conocer sus parámetros fisicoquímicos.
- Elaborar pellets combustibles a partir de bagazo de agave, con y sin pretratamiento fúngico, para obtener información del proceso y datos experimentales para la modelación.
- Caracterizar fisicoquímicamente los distintos pellets obtenidos para compararlos con los requisitos de calidad establecidos.
- Modelar los procesos de producción de los distintos pellets obtenidos, y simular el proceso para conocer sus rendimientos estimados.



## CAPÍTULO II

### 2 REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 AGAVE TEQUILANA

El *Agave tequilana weber* es una planta de porte apenas superior al de un hombre. De hojas rectas y semirrígidas de más de 1 m de longitud y un ancho de 0.08 m aproximadamente, las hojas se estrechan hasta llegar a formar una punta, Figura 2.1. La consistencia de esta planta es corácea, con forma ligeramente cóncava, casi plana y de color grisáceo, con un borde carnosos y recto. En los márgenes, el Agave posee dientes marginales con distanciamiento de 0.01 m y con un largo de entre 0.002 y 0.003 m, de base más o menos triangular. La dentadura marginal es puntiaguda y espinosa. La espina terminal es corta y rígida, con una longitud de 0.01 m.

El pedúnculo floral es de 6 m de altura y cuya panícula ocupa la mitad. El grueso de la base asemeja al brazo de un hombre y tiene unas pocas brácteas lanceoladas subdistantes. La inflorescencia va de 60 a 80 flores, y termina en cuatro o cinco ramos florales (Weber, 1902).



**Figura 2.1** *Agave tequilana* Weber var. Azul (Akin, 2020).

#### 2.2 TEQUILA

El tequila está definido como una “bebida regional obtenida por destilación de mostos, preparados directa y originalmente del material extraído, en las instalaciones de la

fábrica de un productor autorizado la cual debe estar ubicada en el territorio comprendido en la Declaración General de Protección de la Denominación de Origen “Tequila”, sometidos a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no, siendo susceptibles los mostos de ser enriquecidos y mezclados conjuntamente en la formulación con otros azúcares hasta en un proporción no mayor de 49% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa. El tequila es un líquido que puede tener color, cuando sea madurado, abocado o añadido de un color específico” (NOM, 2012).

## 2.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL TEQUILA

El proceso de producción del tequila comprende cuatro etapas principales. A continuación, se brinda información sobre cada una de las etapas.

### 2.3.1 Cocción

La cocción se realiza calentando el agave crudo en un horno, al cual se inyecta vapor por alrededor de 36 h para alcanzar la temperatura de 100 °C. Terminado ese período cesa la inyección de vapor, y se deja el agave dos días más para que termine de cocerse. La cocción del agave tiene tres propósitos. Primero propiciar, junto con el bajo pH, la hidrólisis de inulina y otros componentes de la planta en azúcares libres, fructuosa principalmente. En segundo lugar, algunos azúcares se caramelizan, y algunos compuestos que contribuyen significativamente al aroma y sabor del tequila se producen. Finalmente, el agave cocido tiene una consistencia suave que facilita la molienda (Cedeño, 1995; CRT, 2019).

### 2.3.2 Extracción

La extracción del agave puede ser rudimentaria; ésta consiste en una tina circular donde se coloca el agave, y se hace pasar una piedra redonda que presione y extraiga el jugo del agave. La extracción también puede ser más tecnificada. En este caso, el bagazo se introduce a una desfibradora; posterior a ello, se introduce en un extractor, similar al que se emplea con la caña de azúcar. En dicho extractor se hacen pasar las fibras entre dos rodillos, prensándola y extrayéndole el jugo a su vez (Cedeño, 1995; CRT, 2019).

### 2.3.3 Fermentación

El mosto es el nombre que recibe el producto de la molienda, el cual procede a fermentarse, ya sea por levaduras nativas o por levaduras adicionadas. Como producto del proceso fermentativo se obtiene el alcohol (etanol) (Cedeño, 1995; CRT, 2019).

#### 2.3.4 Destilación

La destilación comprende la separación y concentración del alcohol del mosto fermentado. El mosto, además del alcohol y otros productos secundarios deseables, contiene partículas sólidas del agave. Dentro de las partículas sólidas se incluyen principalmente celulosa, pectina, y células de levadura; adicionalmente, se encuentran proteínas, sales minerales y algunos ácidos orgánicos. En la industria tequilera, los sistemas de destilación más comunes son columnas de fraccionamiento o alambiques (Cedeño, 1995; CRT, 2019).

#### 2.3.5 Residuos del sistema de producción de tequila

Dentro del sistema de producción de tequila, se identifican dos principales residuos: bagazo y vinazas (CRT, 2016). Las vinazas se definen como el residuo líquido resultante del proceso de destilación para la obtención de alcohol. Las vinazas se generan en grandes cantidades, llegando a obtenerse de 10 a 15 L por cada litro de alcohol destilado (Rabelo et al., 2015; Cortezet et al., 2019; Hill & Jack, 2023). Por otra parte, el bagazo es el residuo resultante de la etapa de molienda (Nikodinovic-Runic et al., 2013; CRT, 2019). Por cada piña de agave empleada, 40% en peso de la piña termina como bagazo (Cedeño, 1995). La composición principal del bagazo incluye lignina, celulosa y hemicelulosa (Tabla 1.1).

En la actualidad el único manejo que se le da, de haber algún manejo, es mediante compostaje (CRT, 2019). El composteo de bagazo de agave es un procedimiento tardado, que toma cerca de 20 semanas en completarse; además, el producto final (composta) es un bien de poco valor comercial (Crespo González, 2011). La valorización del bagazo representa un reto, pues debido a su composición química, el residuo resulta de difícil degradación (Abdel-Hamid et al., 2013).

## 2.5 ECONOMÍA CIRCULAR

Conforme la contaminación debida a la generación de residuos y su impacto negativo aumentan, también lo hace la preocupación al respecto. Con el fin de mitigar esta problemática, han surgido varias propuestas. Una de las propuestas más populares es la Economía Circular.

La economía circular se define como un sistema económico que busca reemplazar el concepto de “final de vida” mediante reducción, reúso alternativo, reciclaje y recuperación de los materiales involucrados en los procesos de producción, distribución y consumo. La economía circular opera a nivel micro, meso y macro con el fin de lograr el desarrollo sustentable obteniendo simultáneamente calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social para el beneficio de generaciones actuales y futuras. La economía se posibilita por nuevos modelos de negocio y el surgimiento de consumidores responsables (Kirchherr et al., 2017).

## 2.6 PROCESOS DE REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS

La valorización comprende los procesos de conversión de residuos en productos útiles como lo son combustibles, materiales y químicos (Abdel-Shafy & Mansour, 2018). Existen diferentes procesos de revalorización de residuos, los cuales pueden ser de naturaleza termoquímica, química, biológica, física y bioquímica.

Los procesos termoquímicos aplicados a la biomasa emplean el calor y la catálisis para transformar polímeros de las plantas en combustibles, químicos o energía eléctrica (Zhang & Brown, 2019). Por otra parte, los procesos químicos se definen como etapas de transformación de una materia o materias en un producto de interés de mayor valor, mediante el uso de catalizadores inorgánicos (Martín, 2016).

Los procesos biológicos se definen como la aplicación de principios científicos y tecnológicos que empleen sistemas biológicos, organismos vivos o sus derivados para la obtención de productos para un uso específico (Benvenuto, 2019). Por último, los procesos físicos son operaciones que están relacionadas o involucran la aplicación de fuerzas físicas para la obtención de un producto (Theodore et al., 2017).

## 2.7 BIOMASA

El término biomasa hace referencia a la masa proveniente de organismos vivos, incluyendo plantas animales y microorganismos. Desde el punto de vista de la bioquímica, la biomasa comprendería un amplio rango de compuestos y grupos químicos como la celulosa, lignina, azúcares, grasas y proteínas (Houghton, 2008).

## 2.8 BIORREFINERÍAS

La agencia alemana para recursos renovables define a una biorrefinería como el uso integrativo y multifuncional de la biomasa como una fuente de materias primas, para la generación sustentable de un amplio espectro de intermediarios y productos finales (químicos, materiales, bioenergía/biocombustibles); esto permite el máximo aprovechamiento posible. Los co-productos también pueden incluir alimentos (FNR, 2012).

## 2.9 CULTIVO DE HONGOS

El cultivo de hongos es un proceso que utiliza residuos como las heces de caballo, gallina o cerdos, así como fibras vegetales residuales de trigo, arroz, maíz, forestales, algodón, etc. para producir alimentos nutritivos. Se puede considerar que el cultivo de hongos brinda un beneficio por partida doble (Tseng & Luong, 1984).

### 2.9.1 Sustrato residual de hongos

El sustrato residual de hongos (SMS por sus siglas en inglés) se define como el subproducto obtenido durante el cultivo de hongos, que consta generalmente de restos lignocelulósicos pues no logran degradarse por completo. Además de la lignocelulosa procedente del sustrato usado durante el cultivo de hongos (aserrín, rastrojo de maíz, heces animales, etc.), el SMS se compone también de micelio de hongo, aditamentos del propio cultivo de hongos (cal o yeso), nutrientes y enzimas (Najafi et al., 2019; Leong et al., 2022).

## 2.10 BIOCOMBUSTIBLES

Un biocombustible se define como aquel combustible líquido, sólido o gaseoso producido por la conversión de biomasa. Por ejemplo, bioetanol de la caña de azúcar o maíz, carbón o astillas de madera y biogás de la descomposición anaeróbica de desechos (OECD, 2002).

### 2.11 PELLETS COMBUSTIBLES

Los pellets combustibles forman parte de los biocombustibles sólidos, elaborados a partir de biomasa leñosas o lignocelulósicas (ISO, 2021), de forma cilíndrica con un diámetro entre 6 y 25 mm y una longitud de entre 3.15 y 50 mm (ISO, 2020). Existen múltiples estándares a nivel mundial que buscan regular la calidad de los pellets de acuerdo con el uso intencionado: doméstico, industrial de pequeña y gran escala. El objetivo

de los estándares es certificar la seguridad al emplear los pellets combustibles (Orenberger & Thek, 2010).

#### 2.11.1 Proceso de producción de pellets

Los pellets combustibles se obtienen mediante el proceso de acondicionamiento conocido como densificación de biomasa. Este proceso contempla la compactación y, a su vez, el aumento en la temperatura de la biomasa. De esta manera se obtiene un producto con una elevada densidad energética, baja humedad, así como con tamaño y forma homogéneos. Los pellets combustibles obtenidos se aprovechan a nivel doméstico e industrial para la generación eléctrica y de calor (Sjoding et al., 2013).

Kocsis y Csanády (2019) describen el proceso de elaboración de pellets de la siguiente manera:

- Trituración primaria: En primer lugar, se tritura la materia prima hasta alcanzar un tamaño de entre 10 – 20 mm. Este paso suele hacerse con un triturador ya sea de disco, de tambor o de tornillo.
- Secado: La humedad adecuada para pelletización se encuentra, generalmente, entre 10-13 %. Cuando sea posible, el secado natural en campo puede ser una alternativa económica. Hoy en día, la práctica más común es el secado artificial. La energía empleada en este proceso puede representar hasta el 50% del costo de producción de los pellets. Los equipos comúnmente utilizados son secadoras de tambor o de cinta.
- Segundo triturado e inspección: La materia prima que ha pasado por el primer triturado y el secado aún no es adecuada para densificación, debido a una amplia distribución de tamaño. Dependiendo de la biomasa, el tamaño de partícula requerido puede variar entre 0.2 y 2 mm. En esta etapa el equipo empleado es el molino de martillos.
- Acondicionamiento: En ocasiones, después del segundo triturado, la materia prima puede perder humedad y encontrarse debajo del nivel requerido. Cuando esto sucede lo recomendado es realizar un

acondicionamiento de humedad. Cuando se realiza este proceso, suele emplearse la saturación por vapor.

- **Densificado:** La biomasa triturada pasa por un molde, ahí un rodillo ejerce presión sobre éste, forzándolo a pasar por uno de los agujeros; en ellos, el calor generado por la fricción, y dadas las propiedades fisicoquímicas de la materia prima, ésta se compacta dando forma al pellet.

#### 2.11.2 Parámetros de calidad de pellets

La ISO 17225-1 (2020) especifica las propiedades requeridas para los pellets, éstas son:

- **Normativos**
  - Dimensiones: diámetro y longitud.
  - Humedad.
  - Cenizas.
  - Durabilidad mecánica: La capacidad que tienen las unidades de combustible densificado (pellets y briquetas) de permanecer intactas durante el manejo y transporte (ISO, 2022).
  - Cantidad de partículas finas.
  - Aditivos.
  - Densidad aparente.
  - Poder calorífico.
- **Informativos - Normativos**
  - Concentración de Nitrógeno.
  - Concentración de Azufre.
  - Concentración de Cloro.
  - Carbono fijado.

- Material Volátil.
- Distribución del tamaño de partícula de los pellets desintegrados.
- Informativos
  - Fusibilidad de las cenizas: Conjunto de temperaturas en las que la ceniza comienza a fundirse bajo calentamiento en determinadas condiciones (ISO, 2022).



## CAPÍTULO III

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 MATERIALES

El bagazo de agave fue obtenido de una productora de local ubicada en el estado de Guanajuato. La muestra fue recolectada y transportada a las instalaciones de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala. Por otra parte, el bagazo de agave post cultivo de hongos fue obtenido del Laboratorio de Metabolitos de la Facultad de Ingeniería, posterior al último corte de hongo.

Para el estudio del bagazo de agave con pretratamiento fúngico, se evaluaron dos factores, la composición de la mezcla y el tiempo del cultivo, ambos con dos valores diferentes. La composición de la mezcla comprende una mezcla 70% bagazo de agave, 30% rastrojo de maíz (M1) y 90% bagazo de agave con 10% rastrojo de maíz (M2). Por otra parte, los tiempos de cultivo comprenden 30 días (T1) y 60 días (T2). Las combinaciones de ambos factores se muestran en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1** Tratamientos del experimento de dos factores de bagazo de agave con pretratamiento fúngico.

Mezcla	Abreviatura	Características
Bagazo de agave con pretratamiento fúngico #1	BAPtF-M1T1	Mezcla de 70% bagazo y 30% rastrojo de maíz, cultivado por 30 días
Bagazo de agave con pretratamiento fúngico #2	BAPtF-M1T2	Mezcla de 70% bagazo y 30% rastrojo de maíz, cultivado por 60 días
Bagazo de agave con pretratamiento fúngico #3	BAPtF-M2T1	Mezcla de 90% bagazo y 10% rastrojo de maíz, cultivado por 30 días
Bagazo de agave con pretratamiento fúngico #4	BAPtF-M2T2	Mezcla de 90% bagazo y 10% rastrojo de maíz, cultivado por 60 días

### 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA DE PARTIDA

A continuación, en la Tabla 3.2 se mencionan los estudios de caracterización a los que se sometieron las biomásas de estudio: bagazo de agave con y sin uso previo como sustrato para la elaboración de hongos.

**Tabla 3.2** Variables estudiadas en las biomásas de partida y método mediante el cual fueron cuantificadas respectivamente.

Variable	Método
Humedad	UNE-EN 14774-1
Cenizas	ISO 18122
Sólidos Volátiles	ISO 18123
Carbono	ISO 16948
Nitrógeno Total	
Hidrógeno	
Poder Calorífico	ISO 18125-2017

La norma UNE-EN 14774-1 (Asociación Española de Normalización [AENOR], 2010) describe el método que se emplea para determinar el contenido total de humedad en biocombustibles sólidos. Esta norma indica que la humedad se determina mediante el método de secado en la estufa, y que los resultados obtenidos son de gran precisión. Por otra parte, la norma ISO 18122 especifica el método para la determinación de ceniza de cualquier biocombustible sólido (International Organization for Standardization [ISO], 2015a). La norma ISO 18123 busca definir los requerimientos y métodos usados para determinar los sólidos volátiles de los biocombustibles sólidos. Esta norma está dirigida a toda persona u organización que fabrique, venda, o use maquinaria, equipo, herramientas o plantas enteras relacionadas a los sólidos volátiles; el estándar también aplica para todas las personas y organizaciones involucradas en producir, comprar, vender y utilizar biocombustibles sólidos. El contenido de sólidos volátiles es determinado como la disminución de masa, menos la pérdida debida a la humedad, cuando el biocombustible sólido es sometido a pirólisis parcial bajo condiciones estandarizadas (ISO, 2015b). Por su parte la determinación de carbono, nitrógeno e hidrógeno se llevará a cabo empleando la ISO 16948 (ISO, 2015c); este estándar describe los métodos para la determinación de dichos elementos en biocombustibles sólidos. La norma identifica al método Kjeldahl como el más confiable para la determinación de

nitrógeno en concentraciones menores a 0.1%, y también hace un repaso a algunos otros métodos aplicables. Finalmente, para determinar el poder calorífico se empleará el método ISO 18125:2017.

### 3.3 ELABORACIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES.

Una vez que el bagazo de agave se caracterizó se procedió a la elaboración de los pellets combustibles. Para ello se consideraron cuatro distintos tamaños de partícula, como se muestra en la Tabla 3.3

La reducción de tamaño se llevó cabo mediante un proceso de molienda. Posteriormente se utilizaron tamices con los tamaños de malla mesh 10, 20 y 40 (Tabla 3.3).

**Tabla 3.3** Tamaños de partícula empleados para el proceso de pelletización.

Tamaños de partícula	Descripción
TP 1	Partículas con tamaños mayores a Mesh 10 (2 mm)
TP2	Partículas con tamaños entre Mesh 10 (2 mm) y Mesh 20 (0.841 mm)
TP3	Partículas con tamaños entre Mesh 20 (0.841 mm) y Mesh 40 (0.42 mm)
TP4	Partículas con tamaños menores al Mesh 40 (0.42 mm)

Para la elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave se realizaron pellets con los tamaños de partícula TP2, TP3 y TP4. Por otra parte, para la elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo pretratado, se empleó una mezcla de los tamaños de partícula TP1, TP2 y TP3 (TP1+2+3).

La densificación se llevó a cabo en una peletizadora de rodillos marca Melko con capacidad de 80/120 kg/h. Una vez producidos los pellets se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente. Se cuantificó la cantidad de pellet obtenido por kg de sustrato seco.

### 3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE LOS PELLETS.

Se caracterizaron los pellets obtenidos tanto del bagazo de agave con y sin pretratamiento fúngico. Los parámetros y metodologías empleadas son las mismas que se mencionaron en el apartado 3.2.

Se realizó una prueba ANOVA entre los pellets obtenidos a partir de bagazo de agave para evaluar si existe una diferencia significativa entre los tamaños de partícula. Para los pellets obtenidos de pretratamiento fúngico se realizó un ANOVA de dos factores. Por último, se realizó una regresión lineal para buscar correlaciones entre el contenido de cenizas y el poder calorífico superior.

### 3.5 MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE LOS PELLETS.

Para el modelado y simulación se seleccionaron los tratamientos se modelaron los tratamientos TP1, BAPtF-M1T1, BAPtF-M2T1, BAPtF-M1T2 y BAPtF-M2T2.

Una vez logrado el proceso de pelletización, se recopilaron los datos y se emplearon para construir un modelo del proceso usando el simulador de procesos Aspen Plus.

Con base en la información del proceso se definieron las operaciones realizadas. En la Tabla 3.4 se presentan los módulos contemplados para la modelación de las operaciones.

**Tabla 3.4** Módulos contemplados para la modelación de cada una de las etapas del proceso de pelletización.

Etapa	Módulo
Pretratamiento fúngico	Reactors/Rstoic
Separación	Separators/Sep
Triturado	Solids/Crusher
Tamizado	Solids/Screen
Densificado	Solids/Granulator
Secado	Solids/Drier
Pérdidas por eficiencia	Mixers/Splitters / FSplit

El módulo reactor RStoic se emplea para representar equipos de reacción cuando la cinética de reacción es desconocida o bien no es importante.

Por otra parte, el bloque Sep es un módulo genérico que permite fraccionar un flujo en función de relaciones de flujo o bien fracciones específicas. Este módulo suele emplearse para representar columnas de destilación u otros equipos de separación.

El módulo FSplit divide el flujo de masa en dos o más flujos de salida. Todos los flujos tienen la misma composición y propiedades. Este módulo se emplea para modelar divisiones de flujo entre otras cosas.

El módulo “crusher” simula la ruptura de partículas sólidas en condiciones húmedas o secas. El bagazo de agave en su estado original alimenta el módulo, y el flujo de salida representa el bagazo de agave molido, con su nueva distribución de tamaños de partícula.

El módulo “screen” simula la separación de varios tamaños de partícula en una mezcla. Este módulo simula el proceso de tamizado, que se realiza para separar los tamaños de partícula adecuados para pelletización de aquellos que no son adecuados. Este módulo se alimenta del flujo de salida del módulo crusher (el bagazo de agave, con distribución de tamaños de partícula post-molienda), y sus flujos de salida son bagazo de agave molido adecuado para pelletización y bagazo de agave molido no adecuado para pelletización.

El módulo “granulator” modela la granulación, aglomeración u otros procesos cuyo fin sea aumentar el tamaño de partícula. En este caso particular, se modela la pelletización que compacta varias partículas pequeñas para formar un pellet. Este módulo es alimentado por el flujo de bagazo de agave molido adecuado para pelletización (flujo proveniente del módulo “screen”), y su flujo de salida se conforma de los pellets formados.

El módulo “dryer” simula un proceso de secado continuo. El secado busca retirar humedad del sólido húmedo. Este módulo se empleó para modelar el secado por exposición directa al sol al que se sometieron los pellets con el fin de mejorar su poder calorífico. El flujo de alimentación de este módulo corresponde a los pellets formados, y su flujo de salida comprende los pellets secos. Con base en la información experimental recabada se definieron los flujos dentro del proceso, y así mismo se modificaron los diversos módulos en el simulador.

Por otra parte, se empleó información de la producción de tequila en 2022 para determinar los flujos iniciales del proceso. En dicho año se estima que el consumo de agave para la producción de tequila alcanzó los 2,610,800 toneladas de piñas de agave; se consideró que el 40% en peso corresponde a bagazo de agave residual (Cedeño, 1995), y un tiempo de operación de 8,500 h anuales. Como base de cálculo para los flujos iniciales se obtuvo, entonces, un flujo de 122,861 kg/h de bagazo de agave.

Los flujos de masa para la simulación, a partir del tamizado, se realizaron tomando en cuenta el tamaño de partícula más adecuado para la pelletización de acuerdo con los resultados obtenidos durante la caracterización.

En lo que respecta al análisis de costos se empleó la función economics de ASPEN para la estimación de los cada uno de los equipos del proceso. En caso de que la función economics no arrojara información relacionada a los equipos se obtuvo una cotización del proveedor, y se escaló el costo empleando el factor seis décimos (J. H. Perry, 1963) para el caso del módulo de hongos se obtuvo la información de costos estimada por Cruz-Moreno (Cruz-Moreno, 2019) y se escaló el costo empleando nuevamente el factor seis décimos.

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

La caracterización del bagazo de agave con y sin pretratamiento fúngico, previo al proceso de peletización, se presenta en Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Valores de los parámetros analizados en el bagazo de agave de este estudio, así como de estudios previos.

Referencia	PCS (MJ/kg)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	C (%)	N (%)	H (%)	S (%)
Bagazo de agave (este estudio)	16.78	4.63	15.55	78.60	34.57	1.95	4.38	<0.01
BAPtF-1 (este estudio)	14.44	10.33	20.91	-	31.08	2.24	4.38	<0.01
BAPtF-2 (este estudio)	14.36	6.27	19.711	-	26.25	2	3.45	-
BAPtF-3 (este estudio)	14.41	7.26	22.56	-	33.82	2.94	4.50	0.05
BAPtF-4 (este estudio)	13.81	6.12	52.11	-	32.83	3.11	4.29	0.08
Frijol (Trejo-Zamudio, 2018)	8.22 - 15.99	8.53 - 10.71	4.96 - 6.22	93.66 - 94.59	53.98 - 54.72	0.61 - 6.41	-	-
Aserrín (Vasilatos et al., 2022)	14.725	6.51	2.19	-	-	-	-	-
ENplusA1 (ISO, 2021)			<0.7	-	-	<0.3	-	<0.04
ENplusA2 (ISO, 2021)	16.56	<10	<1.2	-	-	<0.5	-	<0.05
ENplusB (ISO, 2021)			<2.0	-	-	<1	-	

Como puede observarse, el poder calorífico, humedad y contenido de azufre son promisorios. Sin embargo, el contenido cenizas se encuentra por encima del máximo establecido por la norma. En contraste con otros residuos, como el frijol y el aserrín, su valor de poder calorífico y humedad son superiores. De hecho, comparando con los resultados de los otros estudios el bagazo de agave es el único que cumple con el poder calorífico requerido.

#### 4.2 ELABORACIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES

A continuación, en la Tabla 4.2 se presentan las operaciones identificadas en la elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave en orden de ejecución.

**Tabla 4.2** Operaciones que se consideran en la elaboración de pellets combustibles.

Orden	Operación
1	Triturado
2	Tamizado
3	Densificado
4	Secado

En la siguiente Tabla 4.3, se presentan los datos recopilados durante la pelletización. En la primera columna se muestran los diferentes tamaños de partícula trabajados TP1, TP2, TP3 y TP4. Después se muestra la abundancia relativa con la que son obtenidos cada uno de los tamaños de partícula. Por último, se muestra la humedad registrada antes de someter la muestra tamizada a pelletización.

**Tabla 4.3** Datos de distribución de tamaño de partícula y humedad recopilados durante el proceso de la elaboración de pellets combustibles.

Tamaño de partícula	Abundancia relativa	Humedad (%)
Bagazo de agave		
TP1	0	-
TP2	0.125	25



TP3	0.75	25
TP4	0.125	30
BAPtF-1		
TP1	0.193	22
TP2	0.270	
TP3	0.251	
TP4	0.286	-
BAPtF-2		
TP1	0.134	22
TP2	0.248	
TP3	0.257	
TP4	0.361	-
BAPtF-3		
TP1	0.116	21.5
TP2	0.278	
TP3	0.271	
TP4	0.335	-
BAPtF-4		
TP1	0.117	22
TP2	0.259	
TP3	0.249	
TP4	0.375	-

En el caso del bagazo de agave sin pretratamiento, la elaboración de pellets con tamaños de partícula TP2, TP3 y TP4 fue llevado a cabo exitosamente. Por otra parte, en el caso del bagazo de agave con pretratamiento, la elaboración de pellets con tamaño de partícula TP1+2+3 para cada una de las distintas mezclas empleadas fue llevado a cabo exitosamente.

Contemplando todas y cada una de las pruebas realizadas se puede afirmar que es técnicamente factible la elaboración de pellets combustibles a partir de cada una de las materias primas empleadas.

#### 4.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS PELLETS OBTENIDOS.

Con respecto a la caracterización de los pellets elaborados (Tabla 4.4) existe una diferencia entre sus parámetros en comparación con la materia prima, dado que presentan cambios que se alejan de los requeridos; por ejemplo, se presenta una disminución en el poder calorífico y un aumento en el tamaño de partícula. En general, los pellets combustibles obtenidos a partir de bagazo de agave sin pretratamiento se muestran menos promisorios para su uso.

**Tabla 4.4.** Valores de los parámetros analizados en los pellets obtenidos. La norma mencionada es la EN-ISO 17225-2 (ISO, 2021).

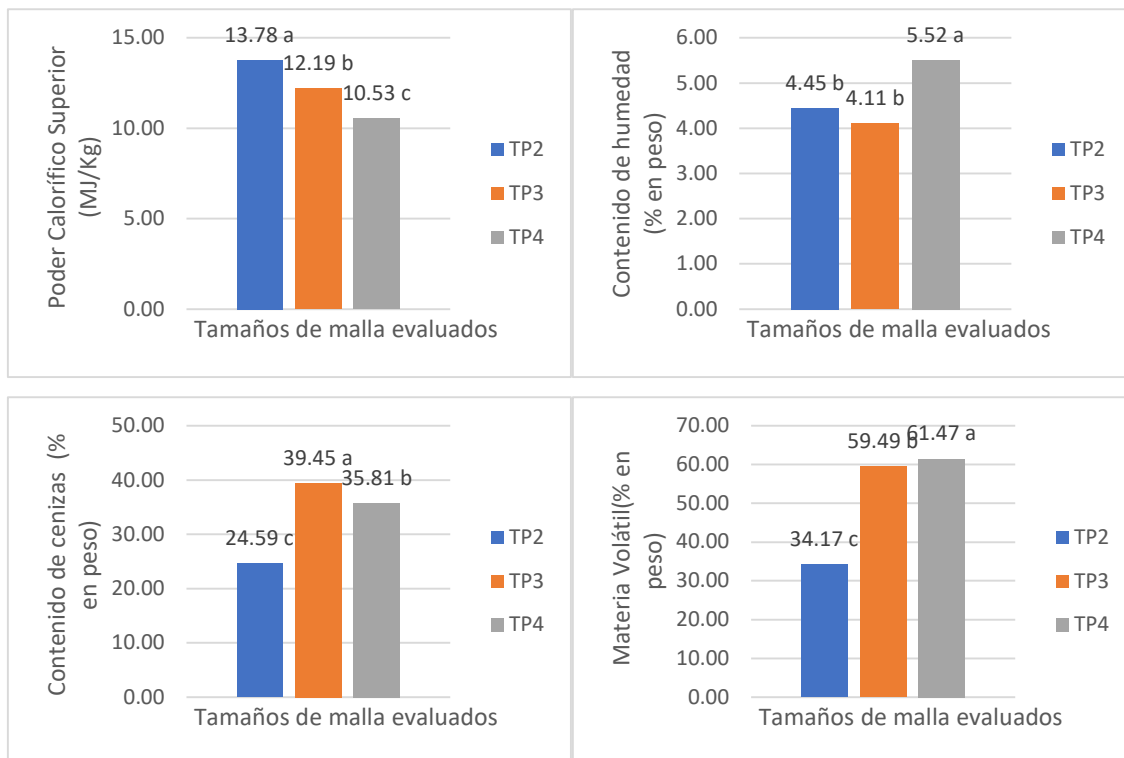
	PCS (MJ/kg)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	C (%)	N (%)	H (%)	S (%)
Bagazo de agave	16.78	4.63	15.55	78.60	34.57	1.95	4.38	<0.01
Pellet BA TP2	13.78	4.45	24.59	34.17	36.79	2.58	4.93	9.87
Pellet BA TP3	12.19	4.11	39.45	34.17	32.06	2.85	4.05	9.67
Pellet BA TP4	10.53	5.67	35.81	61.47	27.50	2.90	3.33	9.62
BAPtF-M1T1	14.44	10.33	20.91	-	31.08	2.24	4.38	<0.01
Pellet de BAPtF-M1T1	17.63	7.94	8.89	-	42.53	1.47	5.87	<0.01
BAPtF-M1T2	14.36	6.27	19.71	-	26.25	2.00	3.45	<0.01
Pellet de BAPtF-M1T2	17.51	8.17	10.20	-	39.71	1.40	5.36	<0.01
BAPtF-M2T1	14.41	7.26	22.56	-	33.82	2.94	4.50	0.05
Pellet de BAPtF-M2T1	17.33	13.27	13.65	-	42.82	2.10	5.77	<0.01
BAPtF-M2T2	13.81	6.12	52.11	-	32.83	3.11	4.29	0.08
Pellet de BAPtF-M2T2	16.68	9.32	15.81	-	40.36	2.16	5.50	<0.01
Astillas de madera (Orenberger & Thek, 2010)	17.64 – 18.72	-	0.4 – 1.3	76.0 – 86.0	47.1 – 51.6	0.09 – 0.17	6.1 – 6.3	0.007 – 0.10
Corteza (Orenberger & Thek, 2010)	17.64 – 20.16	-	2.0 – 5.0	69.6 – 77.2	48.8 – 52.5	0.10 – 0.50	4.6 – 6.1	0.01 – 0.20

Paja (Orenberger & Thek, 2010)	-	-	4.9 – 6.0	70.0 – 81.0	43.2 – 48.1	0.30 – 0.050	5.0 – 6.0	0.05 – 0.11
Restos de corcho (Miranda et al., 2015)	21.41	8.02	4.81	-	50.50	0.43	5.80	0.03
Aserrín de pino (Miranda et al., 2015)	20.80	9.30	0.90	-	50.50	0.48	6.10	0.03
Brotos de vid (Miranda et al., 2015)	18.70	10.80	7.10	-	46.90	0.58	5.70	0.05
Ramas de olivo (Miranda et al., 2015)	18.82	6.50	3.32	-	47.02	0.34	7.62	0.00
Paja de cebada (Miranda et al., 2015)	17.43	7.20	10.51	-	43.85	0.77	5.50	0.10
Paja de trigo (Miranda et al., 2015)	18.25	9.40	9.10	-	45.10	0.91	6.00	0.00
ENplusA1 (ISO, 2021)	16.56	<10	<0.7	-	-	<0.3	-	<0.04
ENplusA2 (ISO, 2021)			<1.2	-	-	<0.5	-	<0.05
ENplusB (ISO, 2021)			<2.0	-	-	<1	-	

Al comparar cada uno de los pellets combustibles elaborados contra los requisitos de calidad de la ISO 17225-1 ninguno de los pellets cumple con la normativa; los pellets más promisorios respecto de sus propiedades fisicoquímicas son los elaborados a partir de bagazo de agave usado para elaboración de hongos, con la etiqueta BAPtF-M1T1. Una aproximación que podría darse a esta biomasa es mezclarla con otras biomásas que sí cumplan con las características necesarias para la elaboración de pellets combustibles, como lo es el aserrín.

#### 4.4.1 Pellets de bagazo de agave

Para el análisis estadístico se observó diferencia significativa entre los tres tratamientos, como se observa en la Figura 4.1.



**Figura 4.1** Representación gráfica de los resultados obtenidos para las propiedades de los pellets elaborados. Las letras indican a que grupo estadístico corresponde cada valor, de acuerdo con la prueba MDS de Tukey con  $p < 0.05$ .

De acuerdo con los grupos estadísticos del MDS se muestra que cada uno de los parámetros obtenidos corresponde a un grupo estadístico diferente; en otras palabras, los pellets obtenidos con diferentes tamaños de malla representan diferencias significativas. En cuanto a lo requerido por la normativa, el tratamiento TP2 se muestra como el más adecuado para elaboración de pellets combustibles pues tiene el mayor contenido de poder calorífico, así como el menor contenido de humedad y de cenizas. Este resultado no lo descarta como una materia prima, pero sería recomendable estudiar las propiedades de pellets combustibles elaborados a partir de mezclas de bagazo de agave con diferentes tamaños de partícula. La presencia de diferencia significativa entre los valores que recibió cada pellet indica que sí existe un efecto en el tamaño de partícula.

En lo que respecta a los elementales también se observan diferencias entre el bagazo y otras materias primas; los contenidos de carbono e hidrógeno son menores, lo que podría estar relacionado con una menor cantidad de compuestos orgánicos. Por otra parte, los contenidos de azufre y nitrógeno se encuentran elevados; ambos sobrepasan tanto a la normativa como a lo reportado en materias primas convencionales y alternativas.

Se sabe que el poder calorífico tiene una relación directa con el contenido de carbono y una relación inversa con el contenido de cenizas (Miranda et al., 2015); por lo que el bajo poder calorífico puede deberse a baja concentración de carbono, al alto contenido de cenizas, o a una combinación de ambos factores. La modificación del contenido de cenizas tendría un doble beneficio, ya que permitiría incrementar el poder calorífico y, a su vez, cumplir con lo establecido en la norma en términos de contenido de cenizas.

Los pellets que presentan los valores más adecuados para todos los parámetros corresponden a TP2. Sin embargo, se puede observar que estos pellets no alcanzan a cumplir con la normativa indicada para poder calorífico superior, contenido de cenizas y contenido de azufre. Con respecto al poder calorífico y el contenido de azufre, cabe resaltar el bagazo de agave empleado como materia prima se encontraba dentro de los parámetros solicitados. Una primera posibilidad es que, durante alguna de las etapas de pelletización éstos se hayan contaminado. Por otra parte, los pellets pasaron por un proceso de secado previo a ser analizados; en este contexto es posible que los contenidos de humedad y azúcar permitieran la proliferación, no contemplada, de microorganismos con procesos biológicos capaces de generar compuestos azufrados tales como las bacterias oxidantes de azufre que, dentro del pellet, podrían tomar  $H_2S$  (g) y depositarlo en el pellet como  $H_2SO_4$  (ac) (Lee et al., 2005; Rana et al., 2020) alterando su composición elemental y sus características fisicoquímicas. De ser así, es posible que controlar el nivel de humedad posterior a que el bagazo sea obtenido de la molienda sea una etapa clave para controlar los parámetros fisicoquímicos del pellet.

Con respecto al poder calorífico y el contenido de azufre, cabe resaltar que la materia prima (bagazo de agave) sí se encontraba dentro de los parámetros solicitados; sin embargo, la única diferencia es el proceso de pelletización, por lo que cabe la posibilidad que, durante dicho proceso, se contaminara la biomasa.

Por otra parte, respecto al contenido de cenizas, se sabe que el bagazo de agave se desecha generalmente dejándose en el suelo (CRT, 2019). Es posible que durante su disposición como desecho el bagazo se combine con tierra del suelo que se compone principalmente de óxidos de silicio y aluminio (Inamuddin et al., 2021), mismos que podrían ser el motivo de la cantidad de ceniza que se reporta tanto en el bagazo como en los pellets (Abdoli et al., 2018). Se desconoce el proceso por el que pasó antes de ser colectado, pero de ser cierta la hipótesis un mayor control en la forma en que desecha la biomasa durante la molienda podría brindar una mejora en la calidad de los pellets al reducir el contenido de ceniza.

#### 4.4.2 Pellets de bagazo de agave con pretratamiento fúngico

Los resultados obtenidos en el ANOVA de dos factores para poder calorífico superior, humedad y contenido de cenizas se muestran en la Tabla 4.5.

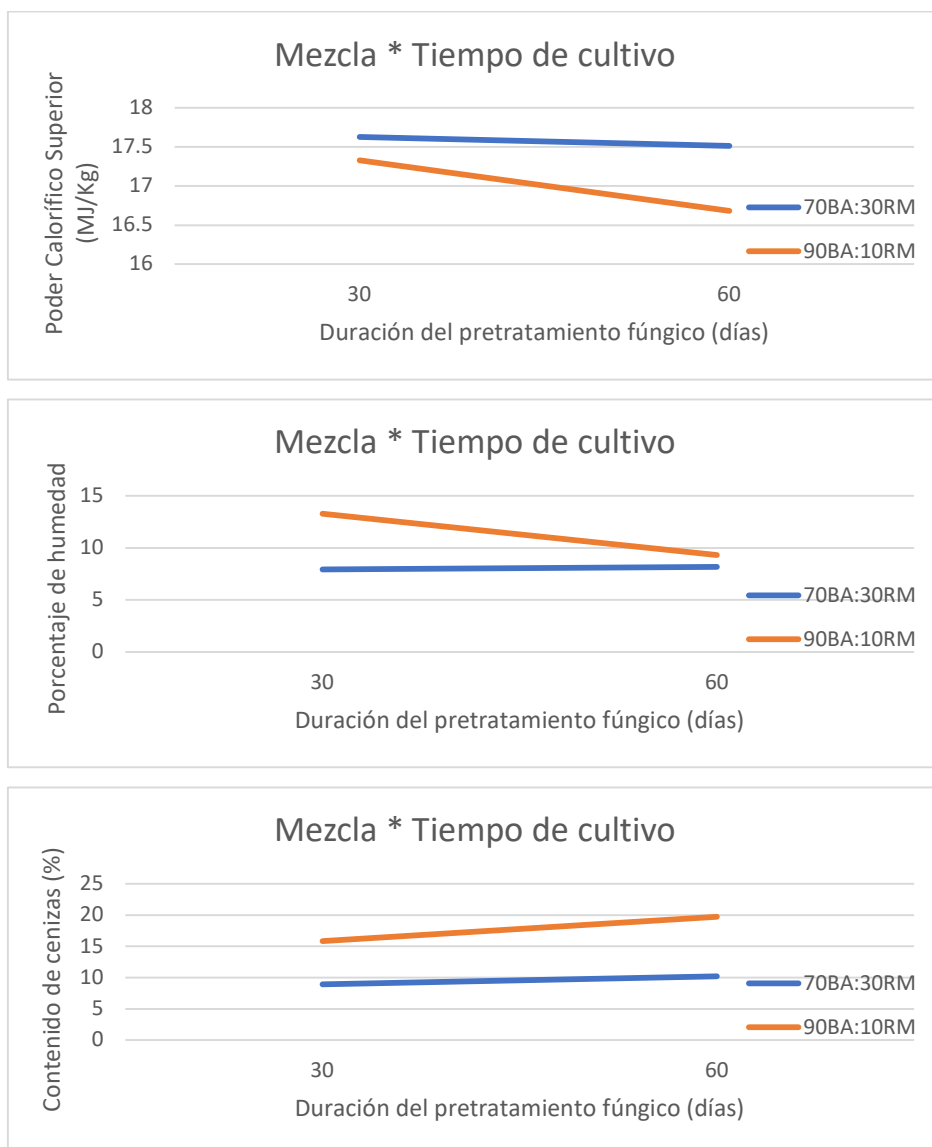
**Tabla 4.5.** Resultados de los ANOVA de dos factores para poder calorífico superior, contenido de humedad y contenido de cenizas.

Poder Calorífico Superior					
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft
					0.05
Mezcla	1	0.960276	0.960276	119.2782	5.318
Tiempo	1	0.43495	0.43495	54.02618	5.318
Interacción	1	0.210993	0.210993	26.20797	5.318
Error	8	0.064406	0.008051		
Suma	11	1.670624			
Humedad					
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft
					0.05
Mezcla	1	31.62253	31.62253	3973.512	5.318
Tiempo	1	10.3788	10.3788	1304.142	5.318
Interacción	1	13.1043	13.1043	1646.614	5.318
Error	8	0.063667	0.007958		
Suma	11	55.1693			
Contenido de Cenizas					
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft
					0.05
Mezcla	1	202.2944	202.2944	12455.27	5.318
Tiempo	1	20.35808	20.35808	1253.447	5.318
Interacción	1	5.005208	5.005208	308.1709	5.318
Error	8	0.129933	0.016242		

Suma 11 227.7876

A partir de los resultados del ANOVA para cada una de las variables (poder calorífico superior, humedad y contenido de cenizas) se encontró que hay diferencia significativa entre la mezcla empleada, el tiempo de cosecha, así como las combinaciones de mezcla y tiempo de cosecha para las variables de poder calorífico superior, contenido de cenizas y contenido de humedad.

Con base en la Figura 4.2 se puede observar que la combinación 70% bagazo de agave con 30% rastrojo de maíz, pretratado por 30 días, presenta el valor más alto de poder calorífico, así como los valores más bajos de humedad y contenido de cenizas. Derivado de estos resultados, se observa que los pellets elaborados con una mezcla 70:30 bagazo de agave con rastrojo de maíz, con un pretratamiento fúngico de 30 días, son los mejores pellets en la comparativa.



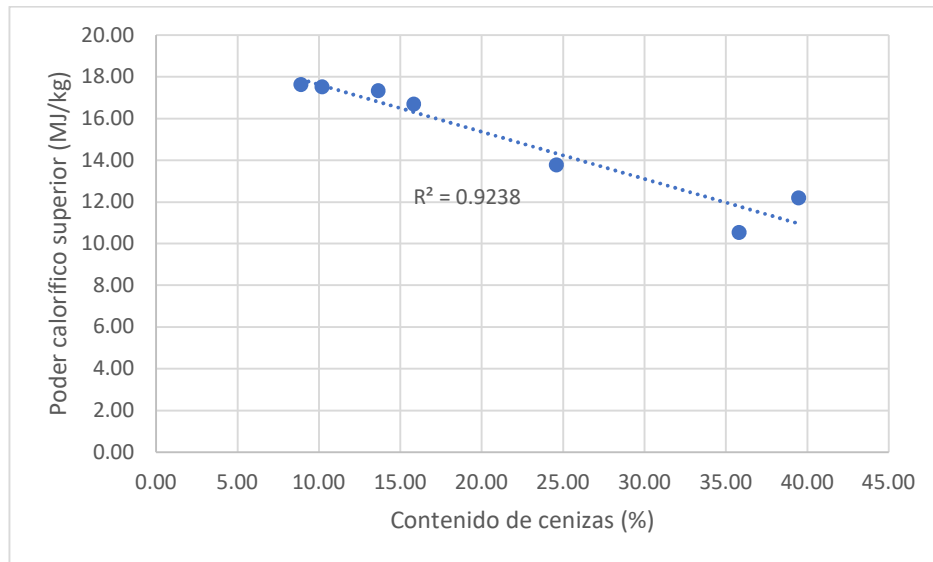
**Figura 4.2** Representación gráfica de los resultados obtenidos para el análisis de dos factores de las propiedades de los pellets elaborados a partir de bagazo de agave empleado como sustrato de hongo.

#### 4.4.3 Análisis global

La Figura 4.3 muestra la correlación entre los valores de PCS y contenido de cenizas. Se encontró un valor de R de -0.96 que indica una fuerte correlación inversamente lineal. De estos resultados se observa que, para los pellets elaborados, a mayor cantidad de cenizas, menor PCS. Es así como, para los pellets que no presentan un valor de PCS adecuado, una

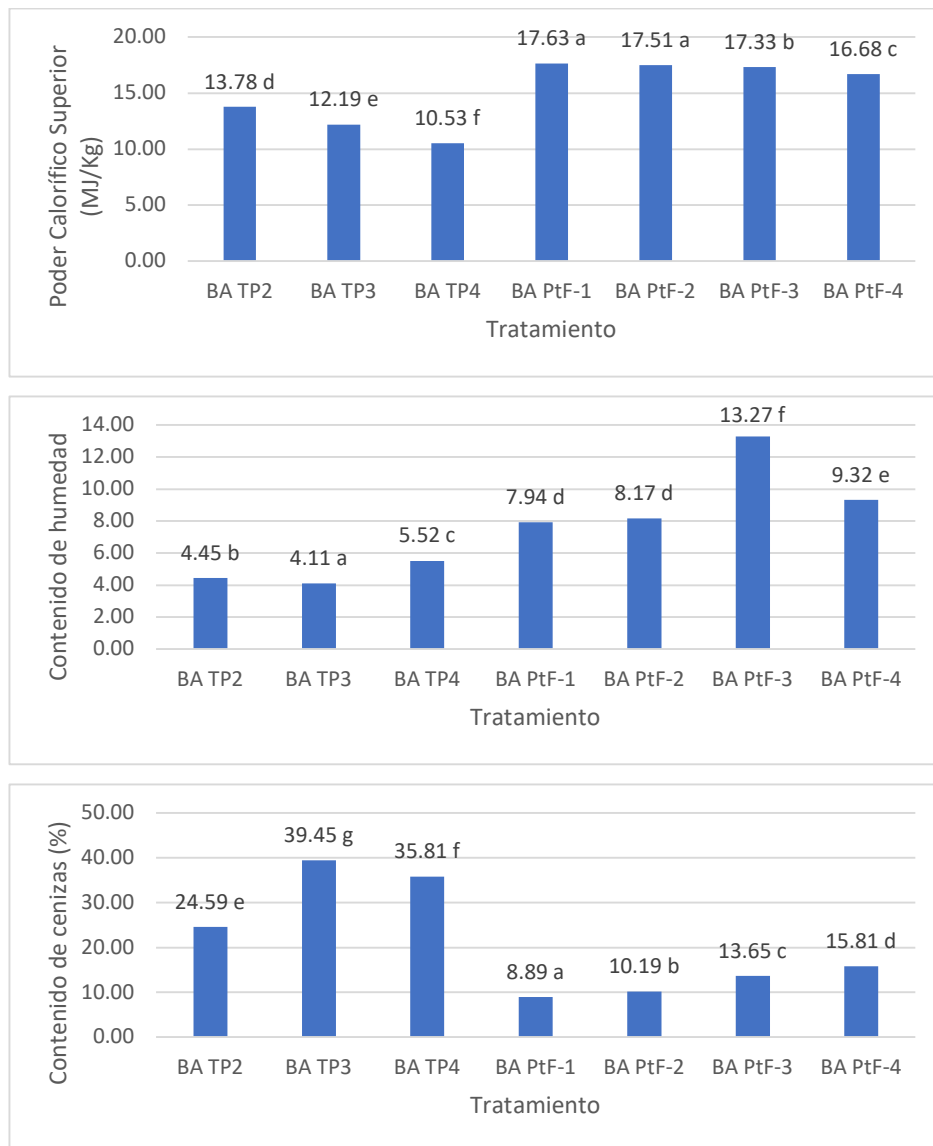


primera alternativa sería buscar disminuir su contenido de cenizas; esto puede lograrse mediante un lavado, la mezcla de este sustrato con uno que tenga un menor contenido de cenizas o bien controlando los procesos de deshecho de estos materiales.



**Figura 4.3.** Regresión lineal entre las variables de contenido de cenizas y poder calorífico superior.

La Figura 4.4 muestra la comparativa entre todos los tipos de pellets obtenidos. Los pellets que pasaron por un pretratamiento fúngico presentan un menor contenido de cenizas que los pellets elaborados con bagazo de agave. Una de las etapas del pretratamiento fúngico es el lavado del sustrato a utilizar, es posible que durante el lavado las sales minerales solubles se lixivien del sustrato y algunas sales no solubles sean arrastradas, lo que daría por consecuencia menor contenido de cenizas. Así mismo se observa que el contenido de cenizas tiene una fuerte correlación inversa con el PCS, situación que sugiere que ésta es la razón por la cual los pellets elaborados con biomasa tratada también tienen un mayor contenido de PCS.

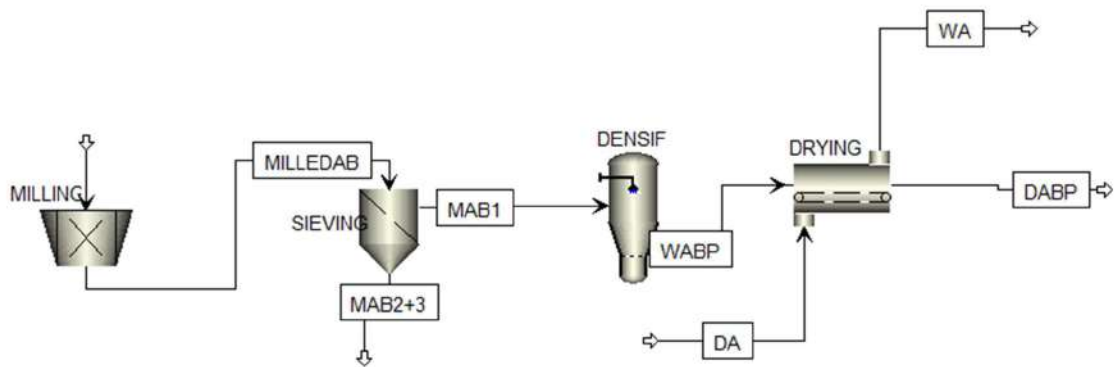


**Figura 4.4** Representación gráfica de los resultados obtenidos para las propiedades de los pellets elaborados al comparar todos y cada uno de los pellets elaborados. Las letras indican a que grupo estadístico corresponde cada valor, de acuerdo con la prueba MDS de Tukey con  $p < 0.05$ .

#### 4.5 MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PELLETS.

Se modelaron y simularon dos procesos distintos en función de la biomasa de partida.

Para la elaboración del modelo de pellets combustibles a partir de bagazo de agave, comprendida por el tratamiento BA TP2, se contemplaron los procesos de molienda, tamizado, densificado y deshidratación. El modelo obtenido se puede observar en la Figura 4.5.



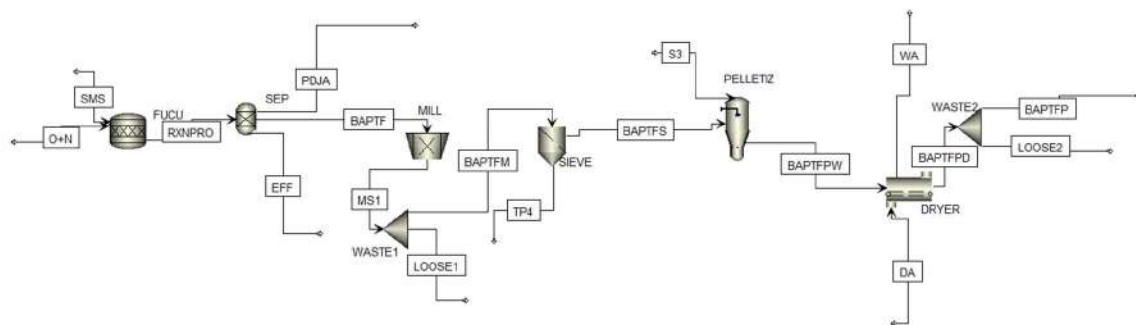
**Figura 4.5.** Modelo elaborado para la producción de pellets combustibles a partir de bagazo de agave.

Para el proceso de elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave, además del producto final, también es apreciable el flujo MAB2+3 que representa el bagazo de agave molido que no se empleó para la elaboración de pellets combustibles.

Para la elaboración del modelo de pellets combustibles a partir de bagazo de agave empleado como sustrato de hongos, además de los procesos mencionados se contempló un reactor para la modelación del proceso de cultivo de hongos; de igual manera se consideró un módulo de separación que representa la separación entre el hongo y el bagazo de agave usado que se da al momento de la cosecha. El modelo obtenido se puede apreciar en la Figura 4.6.

En el caso del proceso de elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave usado como sustrato para hongos el proceso conlleva dos etapas más, el cultivo del hongo y la cosecha de este. Sin embargo, también añade un producto más al sistema de

producción, el hongo comestible *p. djamor*. Cabe añadir que para este proceso se identifican un flujo de biomasa “perdida” etiquetado como TP4, que representa el bagazo de agave usado que no se empleó en la elaboración de pellets combustibles, mismo que corresponde a la biomasa con menor tamaño de partícula. Así mismo, los flujos LOOSE1 y LOOSE2, representan biomasa perdida durante el proceso, propia de la eficiencia de la máquina y el diseño de ésta.



**Figura 4.6.** Modelo elaborado para la simulación del proceso de elaboración de pellets combustibles a partir bagazo de agave usado como sustrato para la elaboración de hongos.

A partir de la modelación y simulación se obtuvieron los siguientes pronósticos de rendimiento (**Tabla 4.6**) así como los pronósticos de costo de equipamiento (**Tabla 4.7**)

**Tabla 4.6.** Rendimientos estimados para cada uno de los sistemas de producción modelados.

Rendimiento (kg/h)	Biomasa				
	BA TP2	BA PtF-1	BA PtF-2	BA PtF-3	BA PtF-4
P. Djamor		20,777	29,682	0	24,634.6
Pellet	16,073	35,476	36,163	39,633	21,673

Con respecto a los flujos estimados, los pellets obtenidos a partir de bagazo de agave son los que menor rendimiento estimado presentan. El sistema de producción que emplea bagazo de agave usado para elaboración de hongos BA PtF-2 presenta los mayores rendimientos de *pleurotus djamor*. Por otra parte, el sistema de producción BA PtF-3 reporta rendimiento de 0 de *pleurotus djamor*, aunque presenta el mayor rendimiento de pellets combustibles.

**Tabla 4.7.** Estimación de costos de equipamiento desglosado por equipo para cada uno de los sistemas de producción modelados (USD).

Equipo	BA	BA PtF-1	BA PtF-2	BA PtF-3	BA PtF-4
Cultivo de hongo	-	9,819,749.00	9,819,749.00	8,445,257.00	8,445,257.00
Molino	83,764.00	55,571.00	60,216.00	56,046.00	51,837.00
Tamiz	18,300.00	18,300.00	18,300.00	18,300.00	18,300.00
Pelletizado	11,962.00	192,037.00	189,695.00	178,424.00	149,510.00
Secado	167,200.00	2,257,200.00	2215,400.00	1,964,600.00	1,463,000.00
Total	281,226.00	12,342,857.00	12,303,360.00	10,662,627.00	10,127,904.00

De acuerdo con la Tabla 4.7, el sistema de producción que contempla la elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave es el de menor costo. Para el resto de los sistemas de producción, también se contempla un estimado del costo de equipamiento del sistema de elaboración de hongos que representa al menos el 80% del costo de equipamiento del sistema completo.

La diferencia de costos se deriva de la planta de elaboración de hongos. Por último, se contempla el precio de venta de \$150 por kilogramo para el hongo, y de \$36 por kilo para el pellet combustible; este último precio se estima con base en el precio de los pellets de madera en venta en el mercado, empleando un tipo de cambio de 16.67 MXN a USD. Así, se obtiene en la Tabla 4.8 un estimado de los ingresos brutos de la venta directa al consumidor final a partir de los bienes. A partir del estimado de ingresos brutos se observa que el sistema de producción que emplea bagazo de agave para la elaboración de hongo rosa y pellets combustibles tiene el mayor ingreso bruto.

**Tabla 4.8.** Estimación de ingresos para cada uno de los sistemas de producción modelados (USD).

Rendimiento (kg/h)	Biomasa				
	BA TP2	BA PtF-1	BA PtF-2	BA PtF-3	BA PtF-4
P. Djamor		186,956.00	267,085.00	0	221,667.00
Pellet	34,711.00	76,613.00	78,096.00	85,590.00	46,804.00
Total	34,711.00	263,569.00	345,181.00	85,590.00	268,471.00

## 5 CONCLUSIONES

Con base en el proyecto de investigación desarrollado se observa que la hipótesis no es aceptada. Los parámetros de calidad de los pellets combustibles elaborados a partir de bagazo de agave usado para elaboración de hongos no son iguales que los parámetros de calidad de los pellets combustibles elaborados a partir de bagazo de agave.

Derivado del experimento se obtuvo también la siguiente información. La elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave es técnicamente factible, al igual que la elaboración de pellets combustibles a partir de bagazo de agave usado como sustrato para elaboración de hongos. Los pellets obtenidos a partir de bagazo de agave sin pretratamiento no cumplen con la normativa ISO17225-1, debido a su elevado contenido de cenizas, nitrógeno y azufre, así como su bajo poder calorífico. Por otra parte, los pellets obtenidos a partir de bagazo de agave usado para elaboración de hongos no cumplen con la normativa ISO17225-1, debido a su elevado contenido de cenizas y de nitrógeno.

Los resultados muestran que existe una fuerte relación lineal inversa entre el poder calorífico y el contenido de cenizas en los pellets combustibles evaluados. En el experimento realizado los pellets combustibles más promisorios son aquellos elaborados con bagazo de agave usado para elaboración de hongo, en una mezcla 70% bagazo, 30% rastrojo de maíz empleados como sustrato para hongos con tiempo de cultivación de 30 días.

## **PERSPECTIVAS**

Dentro de las perspectivas de este trabajo se encuentran.

- Realizar pruebas del bagazo de agave mezclado con aserrín para evaluar la calidad de pellets elaborados con una mezcla de estas biomásas.
- Realizar pruebas del bagazo usado para elaboración de hongos con aserrín para evaluar la calidad de pellets elaborados con una mezcla de estas biomásas.
- Realizar pruebas de pirólisis de los flujos LOOSE1, LOOSE2 y BA2+3 como propuesta para su valorización e incorporación en el esquema de

biorrefinería, con la intención de obtener biochar, bio-oil, o bien ácido piroleñoso a partir de estas biomásas.

- Realizar un análisis de costos de la planta de producción de hongos a mayor escala.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Hamid, A. M., Solbiati, J. O., & Cann, I. K. O. (2013). Insights into Lignin Degradation and its Potential Industrial Applications. In *Advances in Applied Microbiology* (Vol. 82, pp. 1–28). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407679-2.00001-6>
- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. In *Egyptian Journal of Petroleum* (Vol. 27, Issue 4, pp. 1275–1290). Egyptian Petroleum Research Institute. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>
- Abdoli, M. A., Golzary, A., Hosseini, A., & Sadeghi, P. (2018). *Wood Pellet as a Renewable Source of Energy From Production to Consumption*. <http://www.springer.com/series/14538>
- Aguilar, D. L., Rodríguez-Jasso, R. M., Zanuso, E., de Rodríguez, D. J., Amaya-Delgado, L., Sanchez, A., & Ruiz, H. A. (2018). Scale-up and evaluation of hydrothermal pretreatment in isothermal and non-isothermal regimen for bioethanol production using agave bagasse. *Bioresource Technology*, 263, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.100>
- Aguirre-Fierro, A., Ruiz, H. A., Cerqueira, M. A., Ramos-González, R., Rodríguez-Jasso, R. M., Marques, S., & Lukasik, R. M. (2020). Sustainable approach of high-pressure agave bagasse pretreatment for ethanol production. *Renewable Energy*, 155, 1347–1354. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.055>
- Akin, N. (2020). *Verde Uno Agave Planta*. Pixabay.
- Alonso, M., & Rigal, L. (1997). Caracterización y valoración del bagazo de agave tequilana weber de la industria del tequila. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 3(2), 31–39.
- Arreola-Vargas, J., Flores-Larios, A., González-Álvarez, V., Corona-González, R. I., & Méndez-Acosta, H. O. (2016). Single and two-stage anaerobic digestion for hydrogen and methane production from acid and enzymatic hydrolysates of Agave tequilana bagasse. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(2), 897–904. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.016>
- Arreola-Vargas, J., Ojeda-Castillo, V., Snell-Castro, R., Corona-González, R. I., Alatríste-Mondragón, F., & Méndez-Acosta, H. O. (2015). Methane production from acid hydrolysates of Agave tequilana bagasse: Evaluation of hydrolysis conditions and methane yield. *Bioresource Technology*, 181, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.036>

- Arrizon, J., Mateos, J. C., Sandoval, G., Aguilar, B., Solis, J., & Aguilar, M. G. (2012). Bioethanol and xylitol production from different lignocellulosic hydrolysates by sequential fermentation. *Journal of Food Process Engineering*, 35(3), 437–454. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00599.x>
- Benvenuto, M. A. (2019). *Industrial Biotechnology*.
- Breton-Deval, L., Méndez-Acosta, H. O., González-Álvarez, V., Snell-Castro, R., Gutiérrez-Sánchez, D., & Arreola-Vargas, J. (2018). Agave tequilana bagasse for methane production in batch and sequencing batch reactors: Acid catalyst effect, batch optimization and stability of the semi-continuous process. *Journal of Environmental Management*, 224, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.053>
- Buitrón, G., Hernández-Juárez, A., Hernández-Ramírez, M. D., & Sánchez, A. (2019). Biochemical methane potential from lignocellulosic wastes hydrothermally pretreated. *Industrial Crops and Products*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111555>
- Cedeño, M. (1995). Tequila Production. In *Critical Reviews in Biotechnology* (Vol. 15, Issue 1).
- Contreras-Dávila, C. A., Méndez-Acosta, H. O., Arellano-García, L., Alatríste-Mondragón, F., & Razo-Flores, E. (2017). Continuous hydrogen production from enzymatic hydrolysate of Agave tequilana bagasse: Effect of the organic loading rate and reactor configuration. *Chemical Engineering Journal*, 313, 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.084>
- Cortez, L. A. B., Baldassin, R., & De Almeida, E. (2019). Energy from sugarcane. In *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives* (pp. 117–139). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00007-X>
- Crespo González, M. R. (2011). *Proceso de compostaje de bagazo de agave a gran escala y uso de la composta para el cultivo de agave tequilana en contenedor*.
- CRT. (2016). *Estrategia de sustentabilidad de la cadena agave-tequila*.
- CRT. (2019). *Manual del Técnico Tequilero*.
- Cruz-Moreno, B. A. (2019). *Cultivo de hongos comestibles pleutorus djamor y pleurotus ostreatus utilizando residuos de Agave tequilana*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Delfín-Ruíz, M. E., Calderón-Santoyo, M., Ragazzo-Sánchez, J. A., Gómez-Rodríguez, J., & Aguilar-Uscanga, M. G. (2021). Ethanol Production from Enzymatic Hydrolysates Optimized of Agave tequilana Weber var. azul and Agave karwinskii bagasses. *Bioenergy Research*, 14(3), 785–798. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10196-7>
- Duran-Cruz, V., Hernández, S., & Ortiz, I. (2021). Evaluation of Steam Explosion Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis Conditions for Agave Bagasse in Biomethane Production. *Bioenergy Research*, 14(4), 1328–1337. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10245-9>



- Flores-Gómez, C. A., Escamilla Silva, E. M., Zhong, C., Dale, B. E., Da Costa Sousa, L., & Balan, V. (2018). Conversion of lignocellulosic agave residues into liquid biofuels using an AFEX<sup>TM</sup>-based biorefinery. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0995-6>
- FNR. (2012). *Biorefineries Roadmap*.
- Hernández-Vázquez, A., Hernández, S., & Ortíz, I. (2020). Hydrothermal pretreatment of agave bagasse for biomethane production: Operating conditions and energy balance. *Biomass and Bioenergy*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105753>
- Hill, A., & Jack, F. (2023). *Distilled Spirits*. Academic Press.
- Houghton, R. A. (2008). Biomass. In *Encyclopedia of Ecology* (pp. 448–453).
- Huerta-Cardoso, O., Durazo-Cardenas, I., Longhurst, P., Simms, N. J., & Encinas-Oropesa, A. (2020). Fabrication of agave tequilana bagasse/PLA composite and preliminary mechanical properties assessment. *Industrial Crops and Products*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112523>
- Inamuddin, Ahamed, M. I., Boddula, R., & Altalhi, T. (2021). *Applied Soil Chemistry*.
- Iñiguez-Covarrubias, G., Lange, S. E., & Rowell, R. M. (2001). *Utilization of byproducts from the tequila industry: part 1: agave bagasse as a raw material for animal feeding and @berboard production*.
- ISO. (2020). *ISO-17225-1:2020 Solid Biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements*.
- ISO. (2021). *ISO 17225-2:2021 Solid Biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Graded wood pellets*.
- ISO. (2022). *ISO 16559:2022 Solid Biofuels - Vocabulary*.
- Kestur G., S., Flores-Sahagun, T. H. S., Dos Santos, L. P., Dos Santos, J., Mazzaro, I., & Mikowski, A. (2013). Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.09.001>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 127, pp. 221–232). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kocsis, Z., & Csanády, E. (2019). Theory and Practice of Wood Pellet Production. In *Theory and Practice of Wood Pellet Production*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26179-5>
- Langhorst, A. E., Burkholder, J., Long, J., Thomas, R., Kiziltas, A., & Mielewski, D. (2018). Agave-PP composites for cars. In *BioResources* (Vol. 13, Issue 1).
- Lee, E. Y., Cho, K. S., & Ryu, H. W. (2005). Simultaneous removal of H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub> in biofilter inoculated with acidithiobacillus thiooxidans TAS. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 99(6), 611–615. <https://doi.org/10.1263/jbb.99.611>

- Leong, Y. K., Ma, T. W., Chang, J. S., & Yang, F. C. (2022). Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 344). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126157>
- Liñán-Montes, A., De La Parra-Arciniega, S. M., Garza-González, M. T., García-Reyes, R. B., Soto-Regalado, E., & Cerino-Córdova, F. J. (2014). Characterization and thermal analysis of agave bagasse and malt spent grain. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115(1), 751–758. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3321-y>
- Martín, M. M. (2016). *Industrial chemical process analysis and design*. Elsevier.
- Miranda, T., Montero, I., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., & Nogales, S. (2015). A review of pellets from different sources. *Materials*, 8(4), 1413–1427. <https://doi.org/10.3390/ma8041413>
- Montiel, C., Hernández-Meléndez, O., Vivaldo-Lima, E., Hernández-Luna, M., & Bárzana, E. (2016). Enhanced Bioethanol Production from Blue Agave Bagasse in a Combined Extrusion–Saccharification Process. *Bioenergy Research*, 9(4), 1005–1014. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9747-x>
- Montiel Corona, V., & Razo-Flores, E. (2018). Continuous hydrogen and methane production from Agave tequilana bagasse hydrolysate by sequential process to maximize energy recovery efficiency. *Bioresource Technology*, 249, 334–341. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.032>
- Montoya-Rosales, J. de J., Olmos-Hernández, D. K., Palomo-Briones, R., Montiel-Corona, V., Mari, A. G., & Razo-Flores, E. (2019). Improvement of continuous hydrogen production using individual and binary enzymatic hydrolysates of agave bagasse in suspended-culture and biofilm reactors. *Bioresource Technology*, 283, 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.072>
- Muñoz-Páez, K. M., Alvarado-Michi, E. L., Moreno-Andrade, I., Buitrón, G., & Valdez-Vazquez, I. (2020). Comparison of suspended and granular cell anaerobic bioreactors for hydrogen production from acid agave bagasse hydrolyzates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(1), 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.232>
- Najafi, B., Faizollahzadeh Ardabili, S., Shamshirband, S., & Chau, K. wing. (2019). Spent mushroom compost (SMC) as a source for biogas production in Iran. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 967–982. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1658644>
- Nikodinovic-Runic, J., Guzik, M., Kenny, S. T., Babu, R., Werker, A., & O'Connor, K. E. (2013). Carbon-rich wastes as feedstocks for biodegradable polymer (polyhydroxyalkanoate) production using bacteria. In *Advances in Applied Microbiology* (Vol. 84, pp. 139–200). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407673-0.00004-7>
- NOM. (2012). NOM-006-SCFI-2012 Bebidas alcohólicas-Tequila-Especificaciones. In 2012.

- OECD. (2002). *Annex II: Glossary of terms*.  
<http://www.oecd.org/about/publishing/35205971.pdf>
- Orenberger, I., & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook The production and thermal utilization of biomass pellets*. [www.earthscan.co.uk](http://www.earthscan.co.uk)
- Pasaye-Anaya, L., Vargas-Tah, A., Martínez-Cámara, C., Castro-Montoya, A. J., & Campos-García, J. (2019). Production of 2,3-butanediol by fermentation of enzymatic hydrolysed bagasse from agave mezcal-waste using the native *Klebsiella oxytoca* UM2-17 strain. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(12), 3915–3923. <https://doi.org/10.1002/jctb.6190>
- Pérez-Pimienta, J. A., Vargas-Tah, A., López-Ortega, K. M., Medina-López, Y. N., Mendoza-Pérez, J. A., Avila, S., Singh, S., Simmons, B. A., Loaces, I., & Martinez, A. (2017). Sequential enzymatic saccharification and fermentation of ionic liquid and organosolv pretreated agave bagasse for ethanol production. *Bioresource Technology*, 225, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.064>
- Perry, J. H. (1963). *Chemical engineers' Handbook* (R. H. Perry, C. H. Chilton, & S. D. Kirkpatrick, Eds.; Fourth).
- Rabelo, S. C., da Costa, A. C., & Vaz Rossel, C. E. (2015). Industrial waste recovery. In *Sugarcane: Agricultural Production, Bioenergy and Ethanol* (pp. 365–381). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00017-7>
- Rana, K., Rana, N., & Singh, B. (2020). Applications of sulfur oxidizing bacteria. In *Physiological and Biotechnological Aspects of Extremophiles* (pp. 131–136). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818322-9.00010-1>
- Rios-Del Toro, E. E., Arreola-Vargas, J., Cardenas-López, R. L., Valdez-Guzmán, B. E., Toledo-Cervantes, A., González-Álvarez, V., & Méndez-Acosta, H. O. (2021). Two-stage semi-continuous hydrogen and methane production from undetoxified and detoxified acid hydrolysates of agave bagasse. *Biomass and Bioenergy*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106130>
- Rios-Del Toro, E. E., Chi, H., González-Álvarez, V., Méndez-Acosta, H. O., Arreola-Vargas, J., & Liu, H. (2021). Coupling the biochemical and thermochemical biorefinery platforms to enhance energy and product recovery from Agave tequilana bagasse. *Applied Energy*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117293>
- Rosas-Aburto, A., Cano-Díaz, G. S., Vivaldo-Lima, E., Flores-Santos, L., Vega-Hernández, M. A., Hernández-Luna, M. G., & Martinez, A. (2021). Determination of the composition of lignocellulosic biomasses from combined analyses of thermal, spectroscopic, and wet chemical methods. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 60(9), 3502–3515. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05243>
- Sjoding, D., Kanoa, E., & Jensen, P. (2013). *Developing a Wood Pellet/Densified Biomass Industry in Washington State: Opportunities and Challenges Technical Assessment*.
- Tapia-Rodríguez, A., Ibarra-Faz, E., & Razo-Flores, E. (2019). Hydrogen and methane production potential of agave bagasse enzymatic hydrolysates and comparative

- technoeconomic feasibility implications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 17792–17801. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.087>
- Theodore, L., Dupont, R. R., & Ganesan, K. (2017). *Unit Operations in Environmental Engineering*.
- Toledo-Cervantes, A., Arreola-Vargas, J., Elias-Palacios, S. V., Marino-Marmolejo, E. N., Davila-Vazquez, G., González-Álvarez, V., & Méndez-Acosta, H. O. (2018). Evaluation of semi-continuous hydrogen production from enzymatic hydrolysates of Agave tequilana bagasse: Insight into the enzymatic cocktail effect over the co-production of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14193–14201. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.134>
- Trejo-Zamudio, D. (2018). *Producción de pellets de residuos de cultivo de frijol con máximo contenido energético*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Tseng, M. C., & Luong, J. H. (1984). Mushroom Cultivation - Technology for Commercial Production. In *Annual Reports on Fermentation Processes* (Vol. 7, pp. 45–79).
- Urías-Silvas, J. E., Cani, P. D., Delmée, E., Neyrinck, A., López, M. G., & Delzenne, N. M. (2008). Physiological effects of dietary fructans extracted from Agave tequilana Gto. and Dasyilirion spp. *British Journal of Nutrition*, 99(2), 254–261. <https://doi.org/10.1017/S0007114507795338>
- Valdez-Guzmán, B. E., Rios-Del Toro, E. E., Cardenas-López, R. L., Méndez-Acosta, H. O., González-Álvarez, V., & Arreola-Vargas, J. (2019). Enhancing biohydrogen production from Agave tequilana bagasse: Detoxified vs. Undetoxified acid hydrolysates. *Bioresource Technology*, 276, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.101>
- Valdez-Vazquez, I., Alatraste-Mondragón, F., Arreola-Vargas, J., Buitrón, G., Carrillo-Reyes, J., León-Becerril, E., Mendez-Acosta, H. O., Ortiz, I., & Weber, B. (2020). A comparison of biological, enzymatic, chemical and hydrothermal pretreatments for producing biomethane from Agave bagasse. *Industrial Crops and Products*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112160>
- Valencia-Ojeda, C., Montoya-Rosales, J. de J., Palomo-Briones, R., Montiel-Corona, V., Celis, L. B., & Razo-Flores, E. (2021). Saccharification of agave bagasse with cellulase 50 xl is an effective alternative to highly specialized lignocellulosic enzymes for continuous hydrogen production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105448>
- Vasilatos, C., Dimitris, C., Theodorou, T., Stouraiti, C., Andreadi, M., & Koukouzas, N. (2022). *A Comparative Study of Selected Properties of Biomass and Coal Fuels from Greece*. 108. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005108>
- Vital-Jácome, M., Barragán-Trinidad, M., Buitrón, G., & Quijano, G. (2022). Transient shifts in hydraulic retention times improve the methane production from ruminal hydrolysates of agave bagasse. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 97(6), 1536–1544. <https://doi.org/10.1002/jctb.6853>

- Weber, A. (1902). Notes sur quelques Agaves du Mexique occidental et de la Basse-Californie. *Bulletin Du Muséum d'Histoire Naturelle*, 8(3), 218–224.
- Zamora-Gasga, V. M., Bello-Pérez, L. A., Ortíz-Basurto, R. I., Tovar, J., & Sáyago-Ayerdi, S. G. (2014). Granola bars prepared with Agave tequilana ingredients: Chemical composition and invitro starch hydrolysis. *LWT*, 56(2), 309–314.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.016>
- Zhang, X., & Brown, R. C. (2019). *Introduction to Thermochemical Processing of Biomass into Fuels, Chemicals, and Power*.